



AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS PARA INSPEÇÃO DE SOLDAS COM
RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA UTILIZANDO A TÉCNICA PSVS

Aline Saddock de Sá Silva

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro

Março de 2013

AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS PARA INSPEÇÃO DE SOLDAS COM
RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA UTILIZANDO A TÉCNICA PSVS

Aline Saddock de Sá Silva

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

Prof. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.

Prof. Hugo Reuters Schelin, D.Sc.

Prof. Davi Ferreira de Oliveira, D.Sc.

Prof. Marcelino José dos Anjos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2013

Silva, Aline Saddock de Sá

Avaliação dos Procedimentos para Inspeção de Soldas com Radiografia Computadorizada Utilizando a Técnica PSVS/Aline Saddock de Sá Silva. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XVII, 112 p.: il.; 29,7 cm

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 107-112.

1. Radiografia Computadorizada. 2. Inspeção de Soldas. 3. Validação do Procedimento. I. Lopes, Ricardo Tadeu. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*Aos meus pais Névio e Jurema
e ao meu irmão Leonardo.
Ao meu namorado Henrique.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as bênçãos em minha vida.

Aos meus pais Névio e Jurema e ao meu irmão Leonardo por estarem ao meu lado me apoiando e por todo amor, que me fizeram chegar até aqui

Ao meu namorado Henrique pelo carinho, apoio e compreensão em todos os momentos.

Ao Prof. Ricardo Tadeu Lopes (PEN/COPPE/UFRJ) pela orientação, disponibilidade e atenção dada neste trabalho e, principalmente, pela amizade e confiança depositada em mim.

Ao Prof. Davi Ferreira de Oliveira (IF/UERJ), meu grande amigo, por compartilhar seus conhecimentos, me ajudando e participando diretamente em todos os meus trabalhos e, principalmente, pela paciência e amizade todos esses anos.

A todos os colegas e funcionários do Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN), em especial, àqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, os amigos Carlos Augusto e Sandro pela ajuda na realização dos ensaios radiográficos e Cristiane e Renato pela ajuda com as medidas do MEV.

Aos demais amigos do LIN, em especial, Joseilson, Milena, Roberta e Alessandra pela amizade e apoio sempre.

Aos meus amigos da Escola Naval, em especial, Dayse e Allan pela amizade e por estarem sempre ao meu lado e à Prof. Miriam Moraes Puerari (EN/MB) por todo apoio e incentivo.

Ao Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

AValiação DOS PROCEDIMENTOS PARA INSPEÇÃO DE SOLDAS COM RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA UTILIZANDO A TÉCNICA PSVS

Aline Saddock de Sá Silva

Março/2013

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

O objetivo deste trabalho foi avaliar os procedimentos para validação da radiografia computadorizada (RC) na inspeção de soldas em situações de campo, para a técnica de exposição Parede Simples Vista Simples (PSVS), conforme especificado na norma Petrobrás N2821-B. Os testes foram realizados com corpos de prova de espessuras na faixa de 5,33 a 35,71 mm, utilizando diferentes equipamentos de RC e *Image Plates* (IP) disponíveis no mercado. Como fontes de radiação foram empregados raios X e gama, sendo esse último proveniente de fontes de ^{192}Ir e ^{75}Se . Os parâmetros de qualidade de imagem analisados foram Resolução Espacial Básica (BSR), Razão Sinal Ruído Normalizada (SNR_N), contraste e detectabilidade equivalente à técnica convencional. Além disso, com a finalidade de estudar a influência dos IPs na imagem final, os mesmos foram caracterizados a partir da medida da espessura de sua camada sensível e da avaliação do tamanho de grãos e de sua composição elementar. Como resultado desta caracterização, verificou-se que placas em que essas dimensões são menores apresentam Iodo e Bário em menor concentração e Bromo e Flúor em maior, além de gerarem, na maioria dos casos, imagens com melhor BSR. Já com relação à validação do procedimento, observou-se que as imagens foram satisfatórias para espessuras até 18,26 mm com fontes de raios X e até 12,7 mm com fontes de raios gama. Porém, neste último, os tempos de exposição foram mais elevados que os utilizados na técnica convencional, para a maioria dos equipamentos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

EVALUATION OF PROCEDURES TO WELDING INSPECTION WITH
COMPUTED RADIOGRAPHY USING THE SWSI TECHNIQUE

Aline Saddock de Sá Silva

March/2013

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

The aim of this work was to evaluate procedures for employing Computed Radiography (CR) to welding inspections in field conditions using the Simple Wall Simple Image Technique (SWSI), as specified in the Petrobrás N2821-B standard. Tests were performed in samples of thickness ranging from 5.33 to 35.71 mm, using CR scanners and Image Plates (IP) available on the market. As sources of radiation, X-ray and gamma beams (^{192}Ir e ^{75}Se) were used. The quality parameters: Basic Spatial Resolution (BSR), Normalized Signal-to-Noise Ratio (SNR_N), contrast and the detectability equivalent to the conventional technique have been analyzed. In order to determine in which way the properties IPs are correlated to its response in the final image, the thickness of the sensitive layer was determined and the grain size and the elemental composition of this layer were evaluated. In the IP characterization, it has been observed that, the smaller its dimensions are the lower Barium and Iodine concentration and the greater Bromine and Fluorine would be, producing, in most cases, images with better BSR. Regarding the validate procedures, it was found that the images were satisfactory for thicknesses up to 18.26 mm for X-ray and thicknesses up to 12.7 mm for gamma sources. However, in the last, the exposure times were higher than those used at conventional technique, for most equipment.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Revisão Bibliográfica.....	3
CAPÍTULO 2	7
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1 Processo Radiográfico	7
2.1.1 Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria	7
2.1.1.1 Efeito Fotoelétrico.....	7
2.1.1.2 Efeito Compton	9
2.1.1.3 Formação de Par.....	9
2.1.1.4 Importância relativa dos efeitos: Fotoelétrico, Compton e Formação de Par.....	10
2.1.2 Formação da Imagem Radiográfica.....	11
2.2 Termo Fonte	12
2.2.1 Raios X	12
2.2.1.1 Equipamentos de Raios X	14
2.2.2 Raios Gama (γ)	15
2.2.2.1 Irradiadores para Gamagrafia.....	15
A) Iridio (^{192}Ir).....	17
B) Selênio (^{75}Se).....	19
2.3 Imagem Digital.....	21
2.3.1 Qualidade da Imagem.....	21
2.3.1.1 Resolução Espacial.....	21
2.3.1.2 Contraste	22
2.3.1.3 Nitidez da Imagem	24
2.3.1.4 Ruído	26
2.3.1.5 – Razão Sinal Ruído (SNR)	28
2.3.2 Processamento da Imagem Digital	29
2.3.2.1 Restauração/Realce	30
2.3.2.2 Segmentação e Extração de Atributos.....	30
2.3.2.3 Classificação	30
2.3.2.4 Operações Pontuais	31
2.3.2.5 Operações Locais	32
2.3.2.6 Operações Globais	32
2.3.3 Software.....	32

2.4 Radiografia Convencional	33
2.4.1 Processamento do Filme Radiográfico	34
2.5 Radiografia Computadorizada.....	36
2.5.1 Estrutura Física do IP	36
2.5.2 Princípio Físico do IP	37
2.5.3 O Leitor da Radiografia Computadorizada	39
2.5.3.1 Detecção e Conversão do Sinal Fotoestimulado	40
2.5.3.2 Digitalização do Sinal	41
2.6 Comparação entre as Técnicas Radiográficas Convencional e Computadorizada	42
2.7 Indicadores de Qualidade de Imagem - IQIs	44
2.7.1 IQI de Fios - ISO	45
2.7.2 IQI de Fio Duplo	46
2.8 Técnicas de Exposição	48
2.8.1 Técnica de Parede Simples Vista Simples (PSVS)	48
2.8.2 Exposição panorâmica.....	49
2.8.3 Técnica de Parede Dupla Vista Simples (PDVS).....	49
2.8.4 Técnica de Parede Dupla Vista Dupla (PDVD)	50
CAPÍTULO 3	51
MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 Materiais e Equipamentos	51
3.1.1 Corpos de Prova	51
3.1.2 Equipamentos de Radiografia Computadorizada	52
3.1.3 Detectores	53
3.1.3.1 Filme Convencional	53
3.1.3.2 Image Plates (IPs)	53
3.1.4 Fontes de Radiação	54
3.2 Procedimento Experimental	55
3.2.1 Caracterização dos IPs.....	55
3.2.2 Ensaio Radiográficos	55
3.2.3 Avaliação da Qualidade da Imagem.....	59
CAPÍTULO 4	63
RESULTADOS	63
4.1 Caracterização dos Image Plates.....	63

4.2 Radiografia Convencional	65
4.3 Radiografia Computadorizada.....	68
4.3.1 - Qualificação do Procedimento	69
4.3.1.1 Desempenho dos IPs	81
4.3.2 - Validação do Procedimento	82
4.4 Discussão dos Resultados	103
CAPÍTULO 5	105
CONCLUSÕES.....	105
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação do efeito fotoelétrico.....	8
Figura 2.2 - Representação do efeito Compton	9
Figura 2.3 - Representação da formação de par.....	10
Figura 2.4 - Importância relativa dos efeitos fotoelétrico, Compton e Formação de Par	11
Figura 2.5 - Processo radiográfico.....	12
Figura 2.6 - Esquema de um espectro de raios X	13
Figura 2.7 - Elementos básicos de um tubo de raios X.....	14
Figura 2.8 - Ilustração de um irradiador de gamagrafia	16
Figura 2.9 - Dispositivo porta-fonte	17
Figura 2.10 - Esquema de decaimento do ^{192}Ir	18
Figura 2.11 - Espectro em energia do ^{192}Ir	18
Figura 2.12 - Esquema de decaimento do ^{75}Se	19
Figura 2.13 - Espectro em energia do ^{75}Se	20
Figura 2.14 - Comportamento entre os valores de pixel e os tons de cinza.....	21
Figura 2.15 - Estágios de formação do contraste da imagem	23
Figura 2.16 - Contraste obtido sem e com radiação espalhada.....	24
Figura 2.17 - Perda da nitidez devido a distribuição de intensidade do feixe no ponto focal.....	25
Figura 2.18 - Ampliação da imagem em função de distâncias foco-detector diferentes	25
Figura 2.19 - Ampliação da imagem em função de distâncias foco-objeto diferentes	26
Figura 2.20 - Distorção causada pelo não alinhamento do eixo central do feixe.....	26
Figura 2.21 - Contribuição de ruído durante todo o processo de obtenção da radiografia	28
Figura 2.22 - Diagrama de sequência do processamento digital	29
Figura 2.23 - Operações pontuais na imagem digital	31
Figura 2.24 - Operações locais	32
Figura 2.25 - Camada dos filmes radiográficos.....	33
Figura 2.26 - Estrutura Física do IP.....	36
Figura 2.27 - Ilustração do processo de formação da Imagem	39
Figura 2.28 – Esquema do processo de leitura do IP.....	40

Figura 2.29 - Elementos básicos de uma fotomultiplicadora.....	41
Figura 2.30 - Curva de resposta para uma placa de fósforo comparado com um filme de ISO 400 usando um écran de terra rara.....	44
Figura 2.31 - IQI de Fio.....	45
Figura 2.32 - IQI fio duplo	46
Figura 2.33 - Perfil de linha do IQI de fio duplo	48
Figura 2.34 - Técnica de exposição Parede Simples Vista Simples	48
Figura 2.35 - Técnica de exposição parede dupla vista simples	49
Figura 2.36 - Técnica de exposição parede dupla vista dupla	50
Figura 3.1 – Fotografia dos corpos de prova.....	51
Figura 3.2 - Sistema de Digitalização FS50B - GEIT	53
Figura 3.3 - Equipamentos de raios X da (a) Yxlon - XMB225 e (b) GEIT - Isovolt 450 Titan.....	54
Figura 3.4 - Foto do irradiador modelo 880 Sigma - Sentinel.....	54
Figura 3.5 - Esquema experimental.....	56
Figura 3.6 - IQI de fio duplo	59
Figura 3.7 - Determinação do primeiro fio duplo não resolvido	59
Figura 3.8 - Determinação da SNR_N	61
Figura 3.9 – Posicionamento do IQI de fios ISO.....	61
Figura 4.1 - Imagem da camada sensível do IPA obtidas através do MEV com ampliação de 1000x	64
Figura 4.2 - Imagem da camada sensível do IPB obtidas através do MEV com ampliação de 1000x	65
Figura 4.3 - Imagem da camada sensível do IPC obtidas através do MEV com ampliação de 1000x	65
Figura 4.4 - Imagens radiográficas convencionais do CP 711A, utilizando (a) raios X e (b) ^{75}Se	68
Figura 4.5 - Imagens radiográficas convencionais do CP 2540A, utilizando (a) raios X e (b) ^{192}Ir	68
Figura 4.6 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 533A, utilizando o sistema S1 e raios X.....	73
Figura 4.7 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 533A, utilizando o sistema S1 e ^{75}Se	73
Figura 4.8 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 1826C, utilizando o sistema S1 e raios X.....	74
Figura 4.9 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 1826C, utilizando o sistema S1 e ^{192}Ir	74
Figura 4.10 - Imagens radiográficas do CP 1270C, utilizando raios X, com (a) radiografia convencional e os sistemas (b) S1, (c) S2, (d) S3, (e) S4 e (f) S5	75
Figura 4.11 - Comparação dos valores de exposição, para fonte de raios X, requeridos pelos sistemas de RC e pela radiografia convencional, na etapa de qualificação	76

Figura 4.12 - Comparação dos valores de exposição, para fonte de raios γ , requeridos pelos sistemas de RC e pela radiografia convencional, na etapa de qualificação	76
Figura 4.13 - Comparação do contraste IQI ISO central alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios X, na etapa de qualificação	77
Figura 4.14 - Comparação da BSR alcançada pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios X, na etapa de qualificação	78
Figura 4.15 - Comparação da SNR_N alcançada pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios X, na etapa de qualificação	78
Figura 4.16 - Comparação do contraste IQI ISO central alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios γ , na etapa de qualificação	79
Figura 4.17 - Comparação da BSR alcançada pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios γ , na etapa de qualificação	79
Figura 4.18 - Comparação da SNR_N alcançada pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios γ , na etapa de qualificação	80
Figura 4.19 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 1826A, utilizando o sistema S1 e raios X....	93
Figura 4.20 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 1826A, utilizando o sistema S1 e ^{192}Ir	93
Figura 4.21 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 635C, utilizando o sistema S3 e raios X.....	94
Figura 4.22 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 635C, utilizando o sistema S3 e ^{75}Se	94
Figura 4.23 - Imagens radiográficas do CP 635C, utilizando ^{75}Se , com (a) radiografia convencional e os sistemas (b) S1, (c) S2, (d) S3, (e) S4 e (f) S5.....	95
Figura 4.24 - Comparação dos valores de exposição, para fonte de raios X, requeridos pelos sistemas de RC e pela radiografia convencional, na etapa de validação.....	96
Figura 4.25 - Comparação dos valores de exposição, para fonte de raios γ , requeridos pelos sistemas de RC e pela radiografia convencional, na etapa de validação.....	96
Figura 4.26 - Comparação do contraste IQI ISO central alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios X, na etapa de validação	97
Figura 4.27 - Comparação da BSR alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios X, na etapa de validação	98
Figura 4.28 - Comparação da SNR_N alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios X, na etapa de validação	98
Figura 4.29 - Comparação do contraste IQI ISO central alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios γ , na etapa de validação.....	99
Figura 4.30 - Comparação da BSR alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios γ , na etapa de validação.....	99
Figura 4.31 - Comparação da SNR_N alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios γ , na etapa de validação.....	100
Figura 4.32 - Imagens radiográficas do CP 1826A, utilizando ^{192}Ir , com (a) radiografia convencional e (b) o sistema S1.....	101

Figura 4.33 - Imagens radiográficas do CP 2540B, utilizando raios X, com (a) radiografia convencional e (b) o sistema S1 101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Energias e probabilidades de emissão de radiação gama do ^{192}Ir	17
Tabela 2.2 - Energias e probabilidades de emissão de radiação gama do ^{75}Se	19
Tabela 2.3 - Faixa útil de trabalho em aço.....	20
Tabela 2.4 - Parâmetros do IQI de fios (ISO 19232-1, 2004).....	45
Tabela 2.5 - Parâmetros do Indicador de Qualidade da Imagem de Fio Duplo (ISO 19232-5, 2004).....	47
Tabela 3.1 – Especificações dos corpos de prova.....	52
Tabela 3.2 - Características dos equipamentos de RC.....	52
Tabela 3.3 - Descrição dos <i>Image Plates</i>	54
Tabela 3.4 - Parâmetros de exposição	57
Tabela 3.5 - Parâmetros de leitura dos equipamentos de RC utilizando raios X.....	58
Tabela 3.6 - Parâmetros de leitura dos equipamentos de RC utilizando raios γ	58
Tabela 3.7 - Parâmetros do IQI de fio duplo (EN 462-5, 2004).....	60
Tabela 3.8 - Valores exigidos dos parâmetros de qualidade da imagem radiográfica	62
Tabela 4.1 - Composição elementar da camada sensível de cada IP	63
Tabela 4.2 - Tamanho médio dos grãos e espessura da camada sensível de cada IP.....	64
Tabela 4.3 – Valores de exposição, densidade óptica e contraste obtidos com a radiografia convencional utilizando fonte de raios X	66
Tabela 4.4 - Valores de exposição, densidade óptica e contraste obtidos com a radiografia convencional utilizando fonte de raios γ	67
Tabela 4.5 – Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S1, com fonte de raios X	69
Tabela 4.6 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S2, com fonte de raios X	69
Tabela 4.7 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S3, com fonte de raios X	70
Tabela 4.8 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S4, com fonte de raios X	70
Tabela 4.9 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S5, com fonte de raios X	70
Tabela 4.10 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S1, com fonte de raios γ	71
Tabela 4.11 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S2, com fonte de raios γ	71

Tabela 4.12 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S3, com fonte de raios γ	71
Tabela 4.13 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S4, com fonte de raios γ	72
Tabela 4.14 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S5, com fonte de raios γ	72
Tabela 4.15 - Avaliação das imagens para os sistemas de RC, na etapa de qualificação, utilizando raios X	80
Tabela 4.16 - Avaliação das imagens para os sistemas de RC, na etapa de qualificação, utilizando raios γ	81
Tabela 4.17 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S1, com fonte de raios X	83
Tabela 4.18 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S2, com fonte de raios X	84
Tabela 4.19 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S3, com fonte de raios X	85
Tabela 4.20 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S4, com fonte de raios X	86
Tabela 4.21 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S5, com fonte de raios X	87
Tabela 4.22 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S1, com fonte de raios γ	88
Tabela 4.23 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S2, com fonte de raios γ	89
Tabela 4.24 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S3, com fonte de raios γ	90
Tabela 4.25 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S4, com fonte de raios γ	91
Tabela 4.26 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S5, com fonte de raios γ	92
Tabela 4.27 - Percentual de aprovação na análise das imagens para cada sistema RC, na etapa de validação, utilizando raios X	102
Tabela 4.28 - Percentual de aprovação na análise das imagens para cada sistema RC, na etapa de validação, utilizando raios γ	102

LISTA DE SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BAM	<i>Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung</i>
BSR	<i>Basic Spacial Resolution</i> – Resolução Espacial Básica
CP	Corpo de Prova
DFD	Distância Fonte Detector
DO	Densidade Óptica
END	Ensaio Não Destrutivo
IP	<i>Image Plate</i>
IQI	Indicador de Qualidade de Imagem
MTF	<i>Modulation Transfer Function</i> – Função de Transferência Modular
PMT	<i>Photomultiplier</i> – Fotomultiplicadora
PSL	<i>Photoestimulable Luminescence</i> – Luminescência Fotoestimulada
PSP	<i>Photoestimulable Phosphor</i> – Fósforo Fotoestimulável
PSVS	Parede Simples Vista Simples
RC	Radiografia Computadorizada
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> – Razão Sinal Ruído
SNR _N	<i>Normalized Signal to Noise Ratio</i> – Razão Sinal Ruído Normalizada

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os sistemas de tubulações em plantas industriais, principalmente no segmento petrolífero, requerem uma atenção especial, já que, com o passar do tempo, aumentam as chances de problemas como corrosões, trincas e obstruções. Para garantir qualidade na fabricação, assim como monitorar os riscos e condições das tubulações são feitos os Ensaio Não Destrutivos (END). Eles investigam a integridade de equipamentos e materiais sem contudo destruí-los ou introduzir quaisquer alterações nas suas características.

A Radiografia Industrial é uma das inspeções não destrutivas mais importantes para a garantia da qualidade dos tubos soldados (**ZSCHERPEL et al., 2000**). Atualmente, a técnica utilizada para este tipo de inspeção é a radiografia convencional. Contudo, a consolidação de novas tecnologias na área de Radiografia Computadorizada (RC) constitui um grande benefício, uma vez que resulta em ganhos de produtividade, qualidade dos produtos e serviços, redução de custos, tempo e desperdícios.

A RC utiliza o *Image Plate* (IP) como detector sensível à radiação. Os IPs são placas flexíveis feitas de $BaFX:Eu^{+2}$ ($X = Cl, Br, I$), que utiliza o processo de luminescência fotoestimulada (PSL), para formação da imagem (**TAKAHASHI, 2002**). Nesse processo, a energia do estímulo primário é armazenada e liberada após um segundo estímulo. Nessas placas, a aquisição da imagem ocorre em duas etapas: primeiramente há a criação da imagem latente e, em seguida, a transformação desta imagem latente em imagem radiográfica (**MANGO, 2004**).

Com o advento da RC, foram introduzidas novas e importantes mudanças no modo em que as imagens digitais são adquiridas e exibidas, trazendo, com isso, uma melhora da qualidade dessa imagem. As características desses equipamentos são de grande importância na avaliação da qualidade da imagem digital, já que a partir da seleção dos parâmetros adequados é possível obter laudos precisos de acordo com o objetivo da inspeção.

As propriedades físicas dos IPs também são essenciais, já que cada placa é diferenciada uma da outra por possuir características particulares com relação à sua estrutura física e composição, as quais interferem diretamente na qualidade da imagem radiográfica digital.

Atualmente, existem diversas empresas especializadas na fabricação de sistemas RC e de IPs para utilização específica na área de END. Com o desenvolvimento de novos equipamentos que se mostram a cada dia mais eficientes, esta técnica vem se destacando como um método de inspeção que possui diversas vantagens sobre a radiografia convencional. Contudo, os procedimentos de teste ainda se baseiam muito na experimentação, tentativas e erros, devido à falta de uma metodologia consagrada na escolha dos parâmetros como no caso da radiografia convencional (**OLIVEIRA, 2010**).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar procedimentos para utilização da RC na inspeção de soldas em situações de campo, utilizando a técnica Parede Simples Vista Simples (PSVS). Os testes radiográficos foram executados, primeiramente, em laboratório para a qualificação do procedimento e, em seguida, simulando condições de campo para a validação do procedimento proposto, conforme especificado na norma **PETROBRAS N2821-B (2007)**.

Para isso foram utilizados cinco equipamentos de RC (*scanner*) e três IPs, de diferentes fabricantes, disponíveis no mercado. Uma investigação prévia foi realizada, com objetivo de avaliar a influência dos parâmetros que caracterizam cada IP utilizado na qualidade da imagem radiográfica digital, permitindo correlacioná-los com sua resposta na imagem final. As placas foram caracterizadas a partir da determinação da medida da espessura de sua camada sensível, da avaliação do tamanho de grão e da composição química da mesma.

Nas exposições foram empregados raios X e gama (γ), sendo esse último proveniente de fontes de ^{192}Ir e ^{75}Se . Obtidas as radiografias, foram analisados os parâmetros de qualidade da imagem: Resolução Espacial Básica (BSR), Razão Sinal Ruído Normalizada (SNR_N), contraste e detectabilidade equivalente à técnica convencional.

No capítulo 2 será apresentada a fundamentação teórica necessária para a compreensão do tema do trabalho, abordando temas como as características de emissão das radiações X e gama, processos de formação da imagem radiográfica e funcionamento do sistema de radiografia computadorizada.

No capítulo 3 serão descritos os procedimentos experimentais e equipamentos utilizados para realização deste estudo.

Nos capítulos 4 e 5 serão apresentados, respectivamente, os resultados e as conclusões alcançados a partir do estudo proposto, assim como algumas sugestões para futuros trabalhos.

1.1 Revisão Bibliográfica

O fenômeno da luminescência fotoestimulada não é uma tecnologia nova. Sua descoberta deu-se há mais de um século, entretanto, por falta de aplicações práticas, ficou relegada à condição de curiosidade científica por várias décadas. O interesse no fenômeno renovou-se na década de 40, quando foram conduzidas várias experiências em busca de aplicações práticas voltadas, principalmente, para interesses militares. Nada mais derivou desse trabalho, possivelmente por não se dispor na época da tecnologia do computador. A primeira aplicação, em 1947, consistiu em um híbrido no qual se produziu a partir de uma folha fosforescente irradiada com luz infravermelha uma imagem de luminescência fotoestimulada sobre um filme fotográfico.

A RC teve sua primeira aplicação em 1975, quando George Luckey desenvolveu a placa flexível fosforescente para armazenamento de imagem na Eastman Kodak Company. No mesmo ano foi patenteado o primeiro sistema de RC. No entanto, só em 1983 foi comercializado o primeiro equipamento que empregava essa tecnologia. Sua aceitação passou a crescer consistentemente, primeiro em meio à comunidade médica do final da década de 80, e mais tarde, na comunidade industrial.

Paralelo aos avanços tecnológicos da época surgiu a necessidade de um aprimoramento desses sistemas. Isso foi possível a partir da compreensão dos

mecanismos de emissão e produção de placas fosforescentes. Uma revisão do histórico dos fósforos fotoestimuláveis e das pesquisas e projetos dos sistemas de radiografia computadorizada pode ser visto em **GURVICH *et al.* (1996)**, **SEGGERN (1999)** e **TAKAHASHI (2002)**.

Apresentada a origem dos fenômenos de fosforescência e dos possíveis mecanismos de emissão, houve a necessidade de se entender o processo de aquisição da imagem latente, assim como os possíveis processamentos de imagem e fatores que limitavam a qualidade da mesma. **MIYAHARA (1989)** e **SEIBERT (1997)** fizeram uma descrição mais detalhada sobre os fundamentos básicos relacionados ao funcionamento do sistema de RC.

Por tratar-se de um sistema até então novo, estando a pouco tempo no mercado de END, surgiram algumas publicações com comentários abordando a necessidade de comparação com os sistemas já existentes envolvendo a técnica convencional. **FRIJA *et al.* (1998)** propôs a substituição da radiologia pela RC fazendo um estudo comparativo com os detectores da época. Seus resultados enfatizaram os benefícios da técnica proposta.

ZSCHERPEL *et al.* (1998) e **WILLEMS *et al.* (1998)** foram um dos primeiros pesquisadores à avaliar a corrosão em soldas e fazer medidas de espessura de tubo utilizando a RC.

Devido à carência de normas específicas para essa técnica até então nova no mercado, sendo inclusive um dos possíveis fatores que limitavam a ampla utilização da técnica, **EWERT (2000)** fez uma abordagem comparando as normas já existentes para os sistemas convencionais e mencionou a necessidade de padrões para a avaliação dos sistemas e qualificação das imagens radiográficas computadorizadas.

CASTRO (2002) e **VIDEIRA *et al.* (2003)** utilizaram a radiografia computadorizada em refinarias para avaliar a integridade de tubulações e em trocadores de calor para avaliação do estado de corrosão. Também com o objetivo de monitorar

estes componentes visando um nível de confiança adequado para o bom funcionamento das instalações, **DENPRIS (2005)** fez medidas de espessura de dutos com precisão adequada fazendo aumentar a confiança nos resultados comparando-se com a técnica convencional.

Depois de alguns anos de discussão após inúmeras propostas, foram publicadas as normas Norte-Americanas **ASTM 2445 e ASTM 2446 (2005)** e Européias **EN 14784-1 e EN 14784-2 (2005)** com o objetivo de estabelecer os fundamentos da RC, além de descrever os procedimentos para utilização desses sistemas em função da espessura do material inspecionado e da energia e tipos de fontes de radiação, alargando o campo de aplicação da técnica.

A partir dos parâmetros de qualidade estabelecidos pelas normas citadas, **ZSCHERPEL et al. (2007)** fizeram um estudo comparativo entre a qualidade de imagem obtida através da técnica convencional e a RC, determinando a BSR e a SNR_N . Os sistemas (*scanner*+IP) denominados de Alta Resolução apresentaram resultados bastante satisfatórios, apesar do elevado tempo de exposição que este tipo de sistema requer.

MANGO (2007) estabeleceu um método formal para avaliar o desempenho dos sistemas RC, a partir da resposta característica dos IPs e *scanners*, defendendo a proposta de um monitoramento periódico (certificação) para verificar a qualidade exigida atingida pelos sistemas.

No Brasil, a norma **PETROBRAS N2821-B (2007)** foi criada para estabelecer os fundamentos dos END na inspeção de juntas soldadas, descrevendo procedimentos e técnicas, além das exigências de qualidade necessárias para a correta avaliação desse tipo de inspeção

A verificação da adequação da RC com isótopos para inspeção de tubos soldados foi estudada por **MANOHARAM et al. (2008)** e por **JELFS (2009)**. A partir da seleção adequada dos parâmetros de exposição e leitura dos sistemas, eles concluíram a potencialidade da técnica utilizando ^{75}Se , ^{192}Ir e ^{60}Co .

OLIVEIRA (2010) constatou a viabilidade de usar a RC para detectar descontinuidades em materiais compósitos contendo fluídos objetivando simular condições reais de trabalho.

Estudos comparativos entre os sistemas digitais foram realizados por **MACHADO (2011)** para análise de ligas metálicas e por **NASCIMENTO (2012)** na inspeção de soldas. Ambos concluíram as vantagens da utilização da RC, pois os resultados não só atingiram os resultados esperados como superaram os valores exigidos pelas normas.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processo Radiográfico

A radiografia é uma técnica de inspeção não destrutiva fundamentada na absorção diferenciada da radiação pelo objeto que está sendo inspecionada. Quando um determinado material é submetido à radiação penetrante, diferentes regiões dele absorverão quantidades distintas desta radiação. Isso se dá devido às diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na sua composição. Essa absorção diferenciada da radiação poderá ser detectada através de um filme, de um tubo de imagem ou mesmo medida por detectores eletrônicos de radiação (KODAK, 2008).

2.1.1 Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria

Quando a radiação eletromagnética interage com qualquer material, uma série de fenômenos físicos ocorre simultaneamente, cada qual com sua própria probabilidade. Os principais modos de interação desta radiação são: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares. Todos esses processos consistem na transferência parcial ou completa da energia do fóton para a energia do elétron. Estes resultam em mudanças súbitas e abruptas na trajetória do fóton, onde este pode desaparecer inteiramente ou ser espalhado em um ângulo significativo (KNOLL, 1989).

2.1.1.1 Efeito Fotoelétrico

No efeito fotoelétrico, o fóton transfere toda sua energia a um único elétron orbital, que é ejetado com uma energia cinética E_c bem definida, dada pela equação 2.1. A interação acontece com o átomo como um todo e não pode ocorrer para elétrons livres. Para fótons com energia suficiente, a origem mais provável dos elétrons é a camada mais fortemente ligada ou camada K do átomo (KNOLL, 1989).

$$E_c = h\nu - B_e \quad (2.1)$$

Onde h é a constante de Planck, ν é a frequência da radiação e B_e é a energia de ligação do elétron orbital.

Um esquema representativo deste processo está apresentado na Figura 2.1.

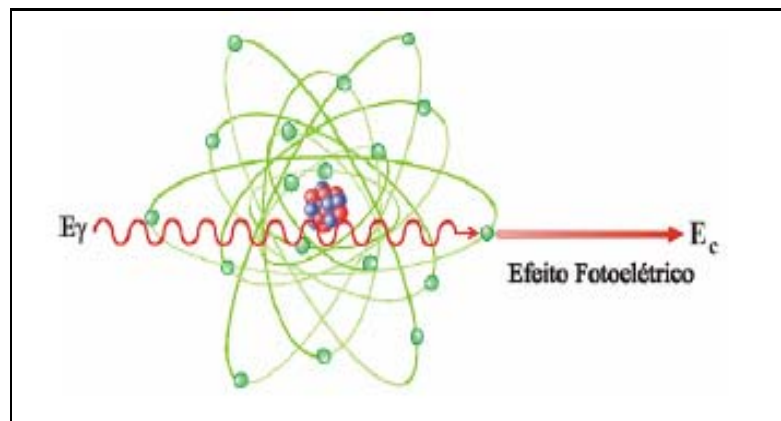


Figura 2.1 - Representação do efeito fotoelétrico (TAUHATA *et al.*, 2003)

A direção de saída do fotoelétron em relação à de incidência do fóton varia com a energia. Para altas energias (acima de 3 MeV), a probabilidade do elétron sair na direção e sentido do fóton é alta, para baixas energias (abaixo de 20 keV) a maior probabilidade é a de sair com um ângulo de 70° . Isto se dá devido a ação dos campos elétricos e magnético que, variando na direção perpendicular à de propagação do fóton, exercem força sobre o elétron na direção de 90° , e se compõe com o momento angular do elétron.

O efeito fotoelétrico é predominante para elementos químicos com valor elevado de número atômico Z e para baixas energias. A probabilidade de esta interação ocorrer aumenta com Z^4 e decresce rapidamente com o aumento da energia (KNOLL, 1989).

2.1.1.2 Efeito Compton

No efeito Compton, o fóton é espalhado por um elétron de baixa energia de ligação, que recebe somente parte de sua energia, continuando sua sobrevivência dentro do material em outra direção. Um esquema representativo deste processo está apresentado na Figura 2.2. Como todos os ângulos de espalhamento são possíveis, a energia transferida para o elétron pode variar de zero até grandes frações de energia do fóton. Assim, a informação associada ao elétron emergente é desinteressante sob o ponto de vista da detecção da energia do fóton incidente. Sua distribuição no espectro de contagem é aleatória, aproximadamente retangular (KNOLL, 1989).

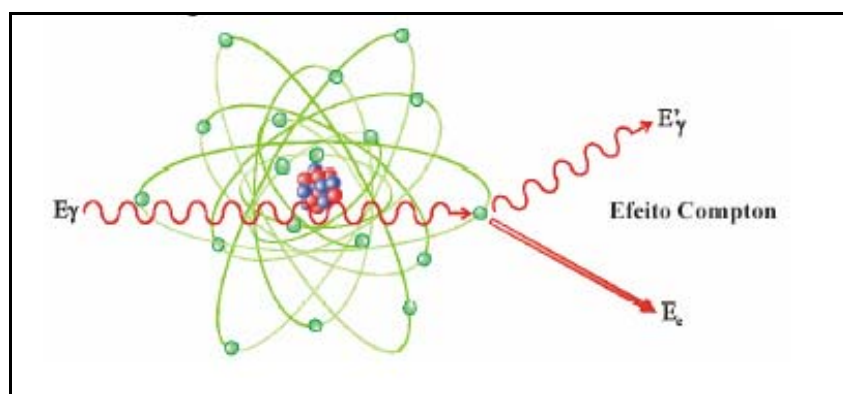


Figura 2.2 - Representação do efeito Compton (TAUHATA *et al.*, 2003)

A probabilidade do efeito Compton por átomo do absorvedor depende do número de elétrons disponíveis como alvos de espalhamento e assim aumenta linearmente com Z .

2.1.1.3 Formação de Par

Uma das formas predominantes de absorção da radiação eletromagnética de alta energia é a produção de par elétron-pósitron. Este efeito ocorre quando fótons de energia igual ou superior a 1,02 MeV passam perto de núcleos de número atômico elevado, interagindo com o forte campo elétrico nuclear. Nesta interação, a radiação desaparece e dá origem a um par elétron-pósitron. Um esquema representativo deste processo está apresentado na Figura 2.3.

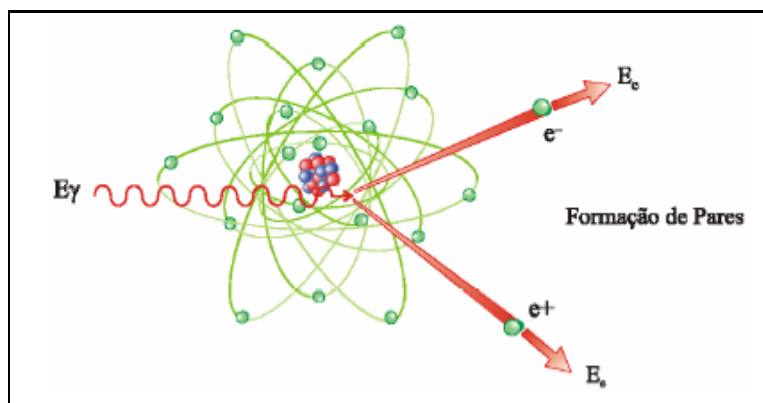


Figura 2.3 - Representação da formação de par (TAUHATA *et al.*, 2003)

O excesso de energia para criar o par se transforma em energia cinética compartilhada pelo elétron e pelo pósitron. Como este último irá subsequentemente se aniquilar, após entrar em um meio absorvedor, dois fótons de aniquilação são normalmente produzidos como produtos secundários da interação.

Não existe uma simples expressão para a probabilidade para a produção de pares por núcleo, porém sua magnitude varia aproximadamente com o quadrado do número atômico do absorvedor (KNOLL, 1989).

2.1.1.4 Importância relativa dos efeitos: Fotoelétrico, Compton e Formação de Par

A Figura 2.4 mostra a variação da participação de cada um dos processos citados para a variação de Z e da energia dos fótons. As interações fotoelétricas predominam para todos os materiais em energias de fótons suficientemente baixas, mas à medida que a energia cresce, o efeito fotoelétrico diminui mais rapidamente que o efeito Compton e este acaba se tornando o efeito predominante. Continuando a aumentar a energia do fóton, ainda que o efeito Compton decresça em termos absoluto, continua aumentando em relação ao efeito fotoelétrico. Acima da energia de alguns MeV para o fóton, a produção de pares passa a ser a principal contribuição para as interações de fótons (KNOLL, 1989).

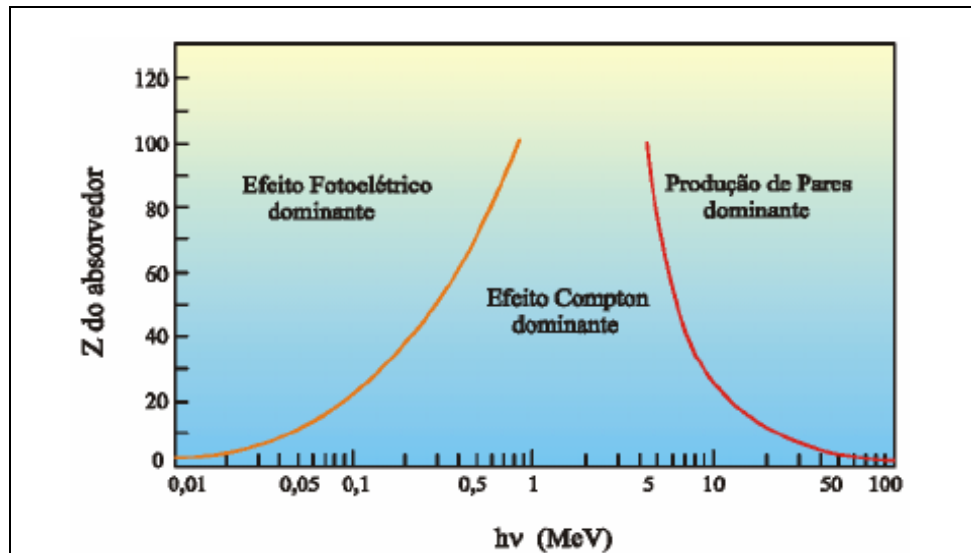


Figura 2.4 - Importância relativa dos efeitos fotoelétrico, Compton e Formação de Par (TAUHATA *et al.*, 2003)

2.1.2 Formação da Imagem Radiográfica

A radiografia é o resultado do uso da radiação para reproduzir a imagem de um objeto em um material fotossensível. Quanto mais denso e espesso for esse objeto, maior será a probabilidade dos fótons do feixe de interagirem com os seus átomos, resultando em um índice menor de transmissão de fótons. Portanto, conforme o feixe emerge do objeto a ser inspecionado, haverá uma variação na intensidade do feixe transmitido, que dependerá da natureza do objeto e da energia da fonte de radiação.

Quando um feixe de radiação X ou gama incide sobre um material de espessura x , parte do feixe é espalhada, parte é absorvida e uma fração atravessa o material sem interagir. Para um feixe monocromático, a intensidade I do feixe emergente está associada à intensidade I_0 do feixe incidente, pela equação 2.2 (KNOLL, 1989).

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (2.2)$$

onde I_0 é a intensidade da fonte de radiação, I é a intensidade da radiação após atravessar o material de espessura x , e μ é o coeficiente total de absorção do material.

A Figura 2.5 mostra um esquema de como ocorre o processo radiográfico. A

descontinuidade aparece no detector devido à variação entre as intensidades da radiação que passa através da parte homogênea do corpo e através da falha. A diferença entre os coeficientes de absorção da radiação μ no material e μ_d na falha, aumenta com o aumento entre a diferença das densidades do objeto com e sem descontinuidade.

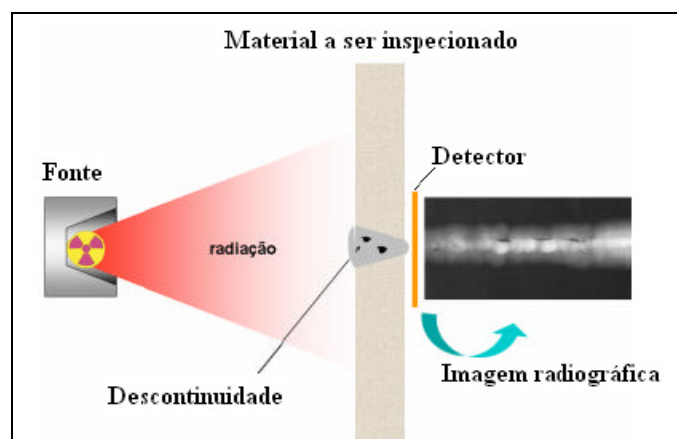


Figura 2.5 - Processo radiográfico (MACHADO, 2011)

2.2 Termo Fonte

Nesta sessão serão apresentadas as principais características de fontes emissoras de radiação utilizadas nas práticas radiográficas: os equipamentos de raios X e os radioisótopos emissores de radiação gama (γ).

2.2.1 Raios X

Os raios X são produzidos de duas maneiras: por freamento (*bremsstrahlung*) ou por ejeção de um elétron orbital de um átomo (raios X característicos).

Quando um elétron passa próximo a um núcleo, a atração entre o elétron carregado negativamente e o núcleo positivo faz com que o elétron seja desviado de sua trajetória, perdendo parte de sua energia cinética. Esta energia cinética perdida é emitida na forma de raios X, conhecido como *bremsstrahlung* ou radiação de freamento. Como esse processo depende da energia e da intensidade de interação da partícula incidente

com o núcleo e de seu ângulo de “saída”, a energia da radiação pode variar de zero a um valor máximo, sendo contínuo seu espectro.

Raios X característicos são produzidos quando um elétron incidente colide com um elétron orbital (geralmente da órbita k), fazendo com que este seja ejetado de sua órbita deixando um “buraco”. Esta condição instável é rapidamente corrigida com a passagem de um elétron de uma órbita mais externa para este buraco. Esta passagem resulta em uma diminuição da energia potencial do elétron e o excesso de energia é emitido como raios X característicos, cujo nome se deve ao fato dos níveis de energia dos elétrons serem únicos para cada elemento, tornando únicos e característicos a cada elemento os raios X emitidos por esse processo. Estes são, portanto, dependentes dos níveis de energia da eletrosfera e, dessa forma, seu espectro de distribuição em energia é discreto.

Dessa maneira, o espectro de raios X é formado de duas partes distintas e superpostas: uma contínua e outra em linhas discretas. A parte contínua se deve aos raios X de bremsstrahlung e vai de energias muito baixas até uma energia máxima, numericamente igual à diferença máxima de potencial aplicada ao tubo. As linhas discretas são em decorrência dos raios X característicos.

Na Figura 2.6 é mostrado um esquema de um espectro de raios X. Nela, o termo k_{α} representa a transição do elétron da camada L para a K e k_{β} a transição do elétron da camada M para a K.

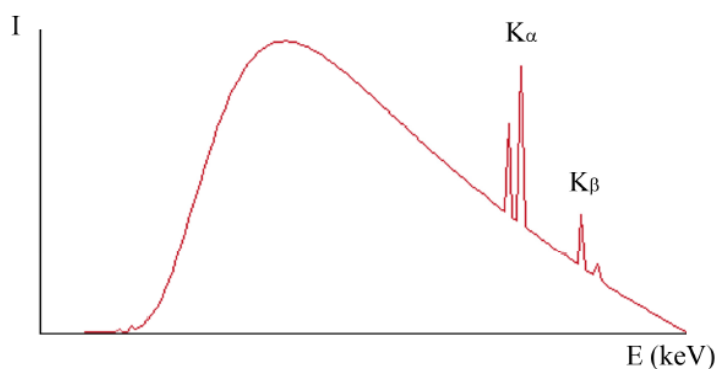


Figura 2.6 - Esquema de um espectro de raios X.

2.2.1.1 Equipamentos de Raios X

Os equipamentos de raios X são aparelhos que emitem radiação X quando energizados, segundo uma tensão e uma corrente pré-estabelecidas. Eles são classificados de acordo com a sua potência e com as aplicações para as quais são projetados. Para fins de inspeção na área industrial, os equipamentos emitem raios X com energia variando entre 10 a 800 keV.

Os dois componentes básicos de um equipamento de raios X são o gerador de alta tensão e o tubo de raios X.

A função dos geradores de alta tensão é produzir uma diferença de potencial necessária para acelerar os elétrons que vão produzir os raios X. Estes potenciais são produzidos através de transformadores elétricos que podem trabalhar com a frequência nominal da rede elétrica ou com médias e altas frequências (ARCAL, 2000).

O tubo de raios X é montado dentro de uma calota protetora de metal forrada com chumbo (cabeçote), contendo uma janela por onde passa o feixe útil. Os elementos básicos de um tubo de raios X estão ilustrados na Figura 2.7.

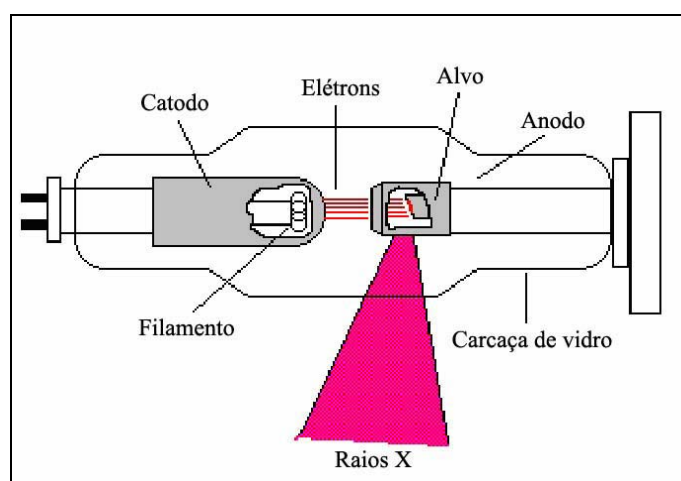


Figura 2.7 - Elementos básicos de um tubo de raios X (ANDREUCCI, 2003)

O tubo de raios X é constituído por uma ampola de vidro com vácuo possuindo dois eletrodos, o ânodo e o cátodo, que são submetidos a uma tensão elétrica da ordem de milhares de Volts, sendo o pólo positivo ligado ao ânodo e o negativo ao cátodo. O

ânodo é constituído de um material metálico maciço, comumente fabricado em tungstênio, também denominado alvo, e o cátodo de um pequeno filamento, tal qual uma lâmpada incandescente, por onde passa uma corrente elétrica da ordem de miliamper.

Quando o tubo é ligado, a corrente elétrica do filamento se aquece e passa a emitir espontaneamente elétrons que são atraídos e acelerados em direção ao alvo. Nesta interação dos elétrons com os átomos do alvo, ocorre a desaceleração repentina dos elétrons, transformando a energia cinética adquirida em raios X.

2.2.2 Raios Gama (γ)

Os raios gama originam-se geralmente de desintegrações no núcleo do átomo e são emissões espontâneas observadas em determinados elementos radioativos naturais e artificiais. Os raios gama também podem ter origem em processos subatômicos como a aniquilação de um par (pósitron-elétron ou próton-antipróton) e em fenômenos astrofísicos. Estes raios se caracterizam por uma série de emissões discretas em energia (KNOLL, 1989).

2.2.2.1 Irradiadores para Gamagrafia

Na área dos Ensaios Não Destrutivos (END), a gamagrafia é uma técnica alternativa ao método de radiografia, utilizando-se uma fonte emissora de raios gama no lugar dos equipamentos de raios X.

Os irradiadores para gamagrafia são equipamentos dotados de mecanismos que permitem expor a fonte radioativa com segurança. A parte principal do irradiador é a blindagem, que permite a proteção do operador a níveis aceitáveis de trabalho. Os irradiadores são construídos de forma a suportar choques, incêndios e outros danos, sem oferecer riscos de vazamento da radiação a níveis acima dos estabelecidos para proteção radiológica. A Figura 2.8 mostra simplificada um irradiador e seus componentes.

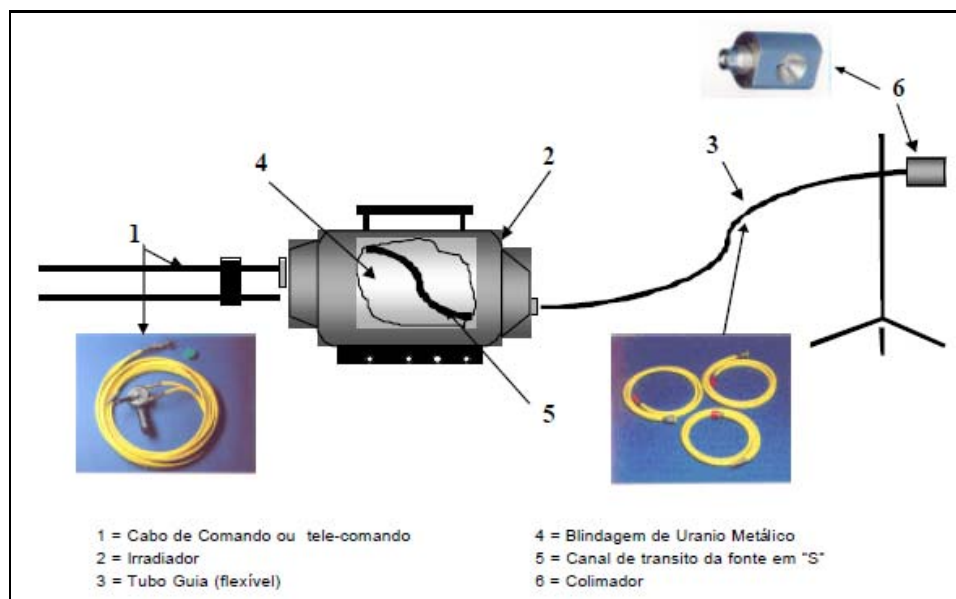


Figura 2.8 - Ilustração de um irradiador de gamagrafia (ANDREUCCI, 2003)

Os principais componentes de um irradiador para gamagrafia são: a blindagem, o tubo guia e os comandos.

A blindagem é responsável por absorver a radiação continuamente emitida pela fonte, mantendo a dose externa dentro dos limites aceitáveis. Geralmente são confeccionadas em chumbo ou urânio exaurido, com revestimento externo em aço inoxidável. O tamanho e peso de um irradiador irá depender da atividade e do tipo de fonte a ser utilizada.

O tubo guia é um tubo que conduzirá a fonte desde a sua blindagem, até o local exato da exposição.

Os comandos são responsáveis pelo acionamento e controle da fonte, levando a fonte da blindagem até o local da exposição através do tubo guia, e recolhendo-a de volta à blindagem após o término da exposição. Estes controles de exposição podem ser elétricos, pneumáticos e mais comumente, manuais (ANDREUCCI, 2003).

A fonte utilizada em gamagrafia consiste em certa quantidade de um determinado radioisótopo encapsulado e lacrado em um invólucro metálico, denominado porta-fonte. Este se destina a impedir o contato entre o material radioativo e o meio externo, evitando assim qualquer tipo de contaminação. A Figura 2.9 mostra um típico porta-fonte.

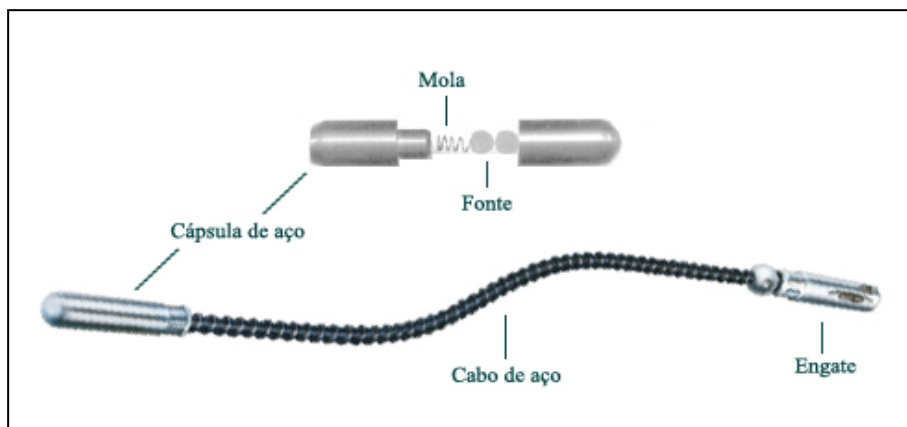


Figura 2.9 - Dispositivo porta-fonte (ANDREUCCI, 2003)

Os isótopos mais utilizados atualmente para a gamagrafia industrial são o ^{60}Co , o ^{75}Se e o ^{192}Ir , de acordo com a espessura que se deseja inspecionar. A seguir será feita uma descrição das fontes de ^{75}Se e ^{192}Ir , que serão utilizadas na execução deste trabalho, devido às características dos corpos de prova analisados.

A) Iridio (^{192}Ir)

O ^{192}Ir é obtido a partir do bombardeamento com nêutrons do isótopo estável ^{191}Ir [$^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192}\text{Ir}$] ou com bombardeamento com deutério do elemento ósmio [$^{192}\text{Os}(d,2n)^{192}\text{Ir}$]. Apresenta meia vida de 73,83 dias. Decai por emissão β^- (95,13%) para níveis excitados da ^{192}Pt e por captura eletrônica (4,87%) para níveis excitados do ^{192}Os . Na transição destes elementos para seus estados fundamentais, ocorre a emissão de radiação γ . A Tabela 2.1 apresenta as energias mais intensas do ^{192}Ir e suas respectivas probabilidades de emissão.

Tabela 2.1 - Energias e probabilidades de emissão de radiação gama do ^{192}Ir

E_{γ} (keV)	I_{γ} (%)
205,796	3,300
295,958	28,67
308,457	30,00
316,508	82,81
468,072	47,83
484,578	3,184
588,585	4,515
604,415	8,230
612,466	5,309

O ^{192}Ir é uma das principais fontes radioativas utilizadas atualmente em gamagrafia industrial devido a sua faixa de penetração que varia de 10 a 80 mm de aço. A Figura 2.10 ilustra o esquema de decaimento e as principais transições energéticas de um isótopo de ^{192}Ir e a Figura 2.11 mostra um espectro em energia típico desta fonte.

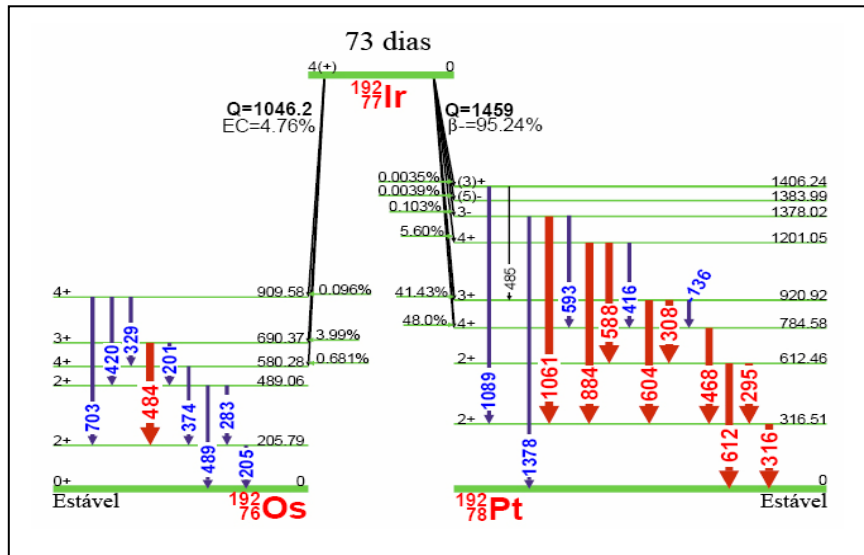


Figura 2.10 - Esquema de decaimento do ^{192}Ir (HELMER *et al.*, 1998)

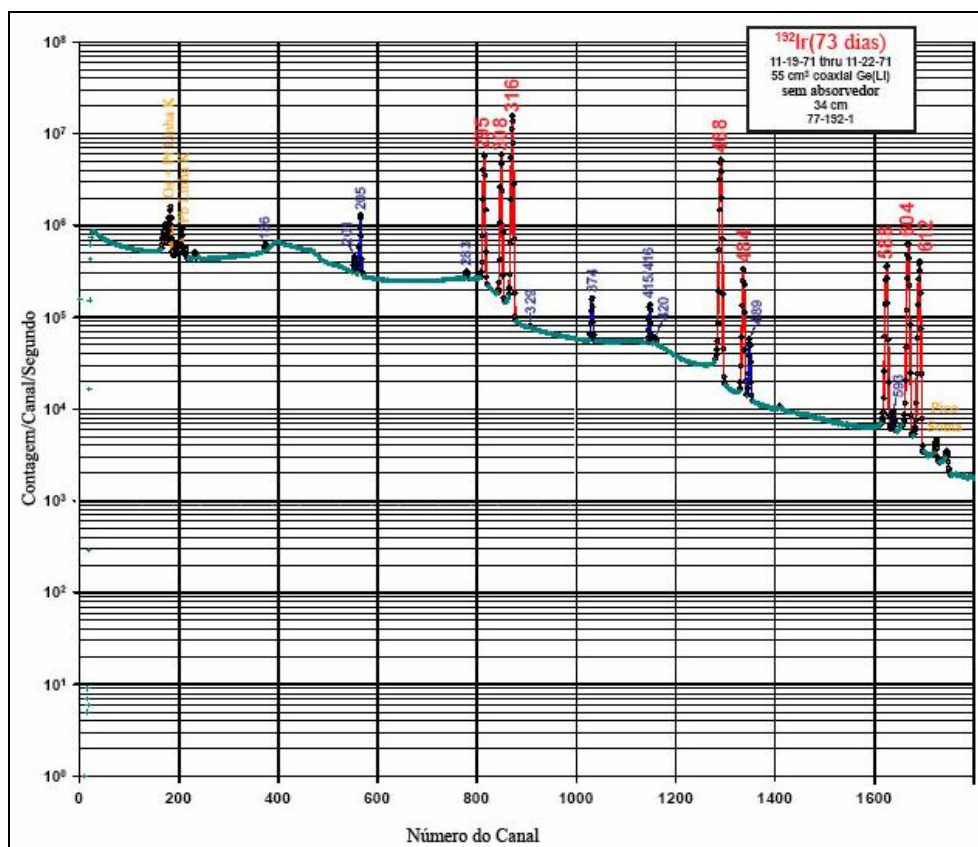


Figura 2.11 - Espectro em energia do ^{192}Ir (HELMER *et al.*, 1998)

B) Selênio (^{75}Se)

O ^{75}Se pode ser obtido através das seguintes reações: $^{74}\text{Se}(n,\gamma)^{75}\text{Se}$, $^{75}\text{As}(d,2n)^{75}\text{Se}$ e $^{75}\text{As}(p,n)^{75}\text{Se}$, possui uma meia vida de 119,79 dias e possui uma faixa de penetração de 5 a 30 mm de aço. O ^{75}Se se desintegra totalmente por captura eletrônica para níveis excitados e para o estado fundamental do ^{75}As , ocorrendo a emissão da radiação gama na transição deste elemento para seu estado fundamental, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Energias e probabilidades de emissão de radiação gama do ^{75}Se

E_{γ} (keV)	I_{γ} (%)
66,0520	1,112
96,7340	3,420
121,116	17,20
136,000	58,30
198,606	1,480
264,658	58,90
279,542	24,99
303,924	1,316
400,657	11,47

A Figura 2.12 ilustra o esquema de decaimento e as principais transições energéticas de um isótopo de ^{75}Se e a Figura 2.13 mostra um espectro em energia típico desta fonte.

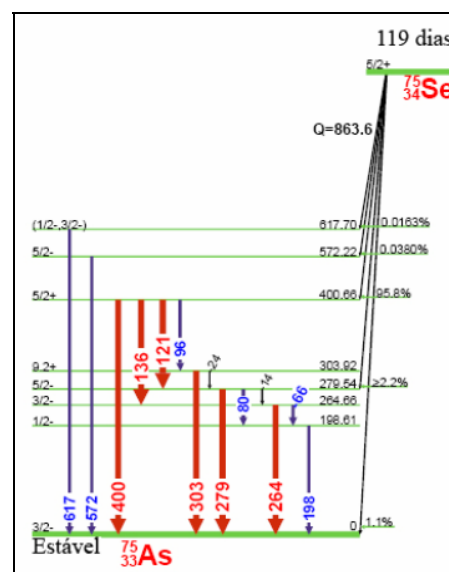


Figura 2.12 - Esquema de decaimento do ^{75}Se (HELMER *et al.*, 1998)

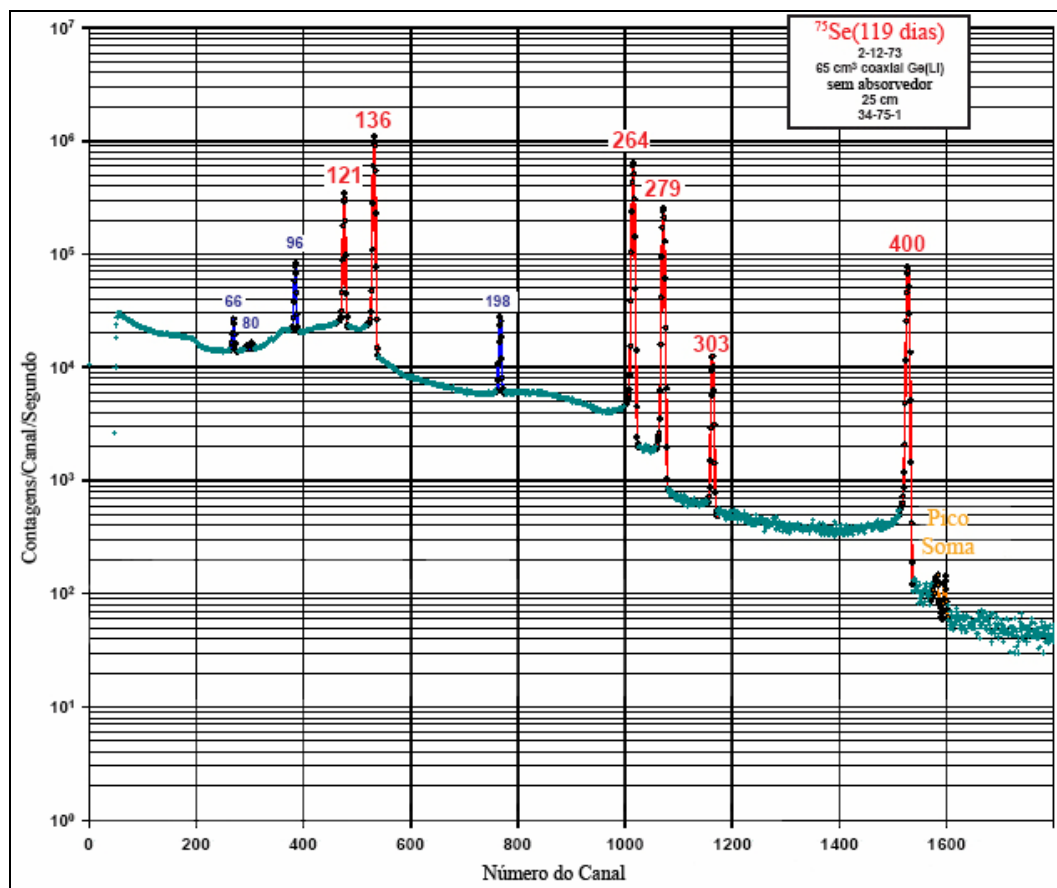


Figura 2.13 - Espectro em energia do ^{75}Se (HELMER *et al.*, 1998)

O ^{75}Se proporciona vantagens em relação ao ^{192}Ir , como meia-vida longa, maior segurança do operador, menor zona de exclusão operacional e alta qualidade de imagem, especialmente na faixa de trabalho. A Tabela 2.3 mostra a faixa útil de trabalho em aço para inspeções com essas fontes (MACHADO, 2011).

Tabela 2.3 - Faixa útil de trabalho em aço

Fonte	$T_{1/2}$	Espessura em aço (mm)	Energia (KeV)
^{60}Co	5a	60 a 130	1170 - 1330
^{192}Ir	72d	10 a 80	206 - 612
^{75}Se	120d	5 a 30	97 - 401
^{169}Yb	32d	até 20	63 - 308
^{170}Tm	129d	até 15	52 - 84
^{153}Gd	242d	até 15	41 - 103

2.3 Imagem Digital

A imagem digital consiste em uma matriz onde cada elemento, ou *pixel*, é representado por um valor numérico que simboliza uma tonalidade de cor. A imagem digital é armazenada através de dígitos binários denominados bits, que podem assumir os valores 0 ou 1. Um conjunto de bits chama-se byte. Os bits e bytes são usados para representar os *pixels* da imagem digital. Diferentes configurações de bytes representam as diversas tonalidades dos *pixels* (OLIVEIRA, 2007). A Figura 2.14 mostra a relação entre as configurações de bytes, valores de *pixel* e tonalidades de cinza.

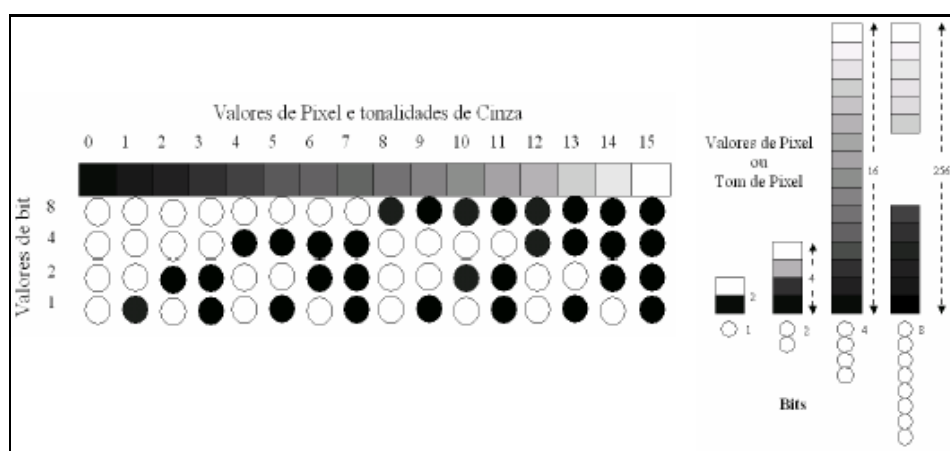


Figura 2.14 - Comportamento entre os valores de pixel e os tons de cinza (OLIVEIRA, 2007)

2.3.1 Qualidade da Imagem

2.3.1.1 Resolução Espacial

Um dos principais parâmetros que afetam a qualidade da imagem digital é a resolução espacial. A resolução espacial é definida como sendo a menor separação (distância) entre dois pontos da imagem que podem ser distinguidos ou visualizados.

O tamanho e a quantidade de *pixels* de uma imagem são fatores determinantes para a análise de detalhes em uma imagem digital. Desde que cada *pixel* tenha somente um valor numérico ou escala de cinza, não é possível ver qualquer detalhe com apenas um *pixel*, uma vez que todas as estruturas dentro da área coberta por este *pixel* serão

representadas por um único valor numérico ou escala de cinza. Conseqüentemente, boa resolução requer *pixels* pequenos que são obtidos por selecionar matrizes de grandes dimensões.

Outro fator importante é o número de bits usados para representar cada *pixel*. Este fator afeta o número de escalas de cinza ou níveis de nitidez: quanto maior o número de bits por *pixel*, maior será a escala de tons de cinza, ou níveis de brilho da imagem (OLIVEIRA, 2007).

2.3.1.2 Contraste

Contraste é o grau de diferenciação entre duas estruturas adjacentes, e sua função é tornar visíveis as interfaces e estruturas do objeto inspecionado. O contraste é função da espessura e da diferença de densidade ou composição química (número atômico) do objeto, e pode ser dividido em três tipos: contraste do objeto, do sujeito e da imagem (CORREA, 2005) (SPRAWLS, 1995). A Figura 2.15 mostra os estágios de formação do contraste da imagem.

Contraste do objeto - Para um objeto ser visível em uma imagem radiográfica, este objeto deve possuir contraste físico em relação ao meio no qual está inserido. Este contraste, denominado contraste do objeto, é função da diferença de densidade ou composição química (número atômico) do objeto em relação ao meio. O contraste do objeto é proporcional ao produto de sua densidade e espessura (SPRAWLS, 1995).

Contraste do sujeito - Após a interação da radiação com diferentes estruturas do corpo, emerge destas uma radiação cuja distribuição em energia é diferente daquela que penetrou no corpo, devido ao fato de, no trajeto haver estruturas de características diferenciadas. A essa nova distribuição de energias que compõem o feixe dá-se o nome de imagem área (SILVA *et al.*, 2000). A partir disso, pode-se definir uma grandeza bastante útil quando se trata da produção de uma imagem: o contraste do sujeito. O contraste do sujeito é a diferença na exposição entre vários pontos dentro da imagem área. Este é afetado, além do contraste do objeto, pelos fatores que influem na qualidade

da radiação, tais como a tensão aplicada, o material do ânodo, o *ripple* e a filtração (SCURI, 1999).

Contraste da imagem - O contraste da imagem radiográfica depende basicamente das características das estruturas do objeto a ser inspecionado, como densidade e espessura, da distribuição de energia dos fótons, da intensidade de fótons que emergem do objeto, das características do filme e do processamento da imagem.

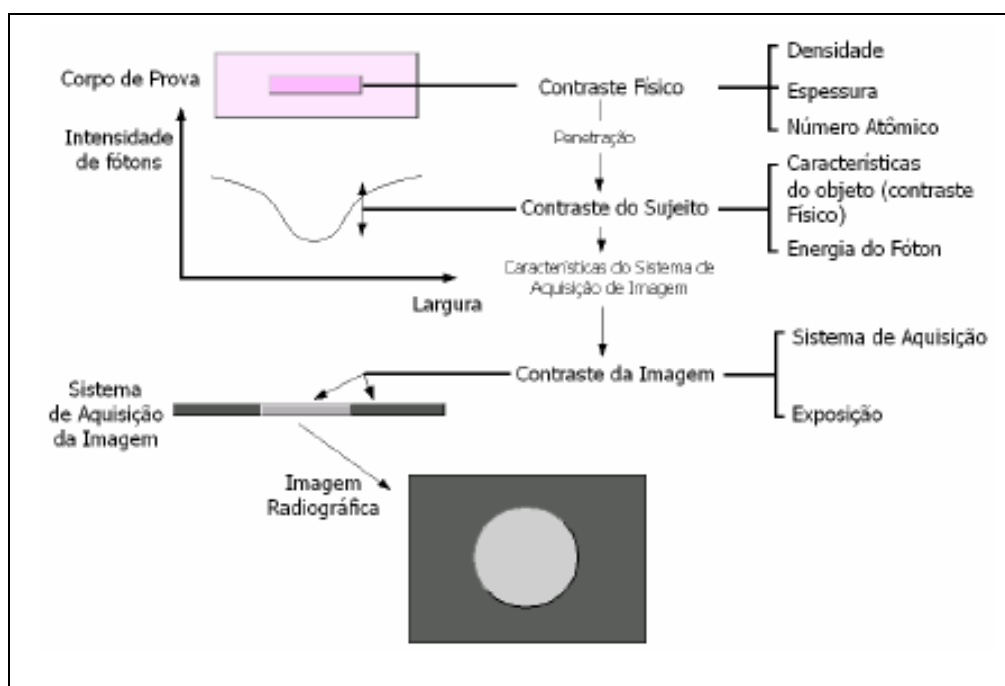


Figura 2.15 - Estágios de formação do contraste da imagem (SPRAWLS, 1995)

A seguir estão descritos os principais fatores que afetam o contraste:

A) Radiação Espalhada

Um fator que influencia o contraste da imagem é a radiação espalhada (ou dispersa). O contraste diminui exponencialmente com o aumento deste tipo de radiação (SPRAWLS, 1995). A radiação espalhada influencia na imagem radiográfica, diminuindo o contraste, principalmente nas regiões claras do filme, mascarando os detalhes situados nestas áreas. A Figura 2.16 mostra o contraste de uma imagem obtida sem e com a radiação espalhada.

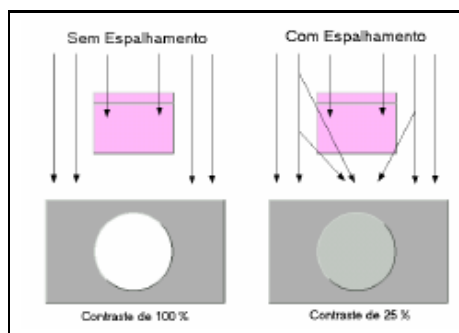


Figura 2.16 - Contraste obtido sem e com radiação espalhada (SPRAWLS, 1995)

B) Energia do Feixe de Radiação

A energia é um dos fatores que mais influenciam o contraste radiográfico, controlando a capacidade de penetração do feixe de radiação (SPRAWLS, 1995). Quanto maior a energia, menor será a diferença entre a intensidade de fótons provenientes das várias densidades do objeto, dando origem a uma imagem de baixo contraste.

2.3.1.3 Nitidez da Imagem

A nitidez da imagem esta associada com o grau de visualização de detalhes e é demonstrada pela clareza de linhas estruturais finas e pelas bordas de estruturas visíveis na imagem radiográfica. A insuficiência de detalhes ou definição é conhecida como “borramento” da imagem. Uma imagem é considerada ideal quando cada ponto dentro do objeto inspecionado é representado por um pequeno e bem definido ponto na imagem. No entanto, na prática, isto não acontece. As representações geométricas de estruturas, na imagem, sempre estão associadas a um grau de “borramento” (SPRAWLS, 1995).

A seguir estão descritos os principais fatores que afetam a nitidez da imagem:

A) Distribuição da Intensidade do Feixe no Ponto Focal

A nitidez de uma imagem varia com a distribuição de intensidade do feixe através do ponto focal (SPRAWLS, 1995). A Figura 2.17 mostra a perda da nitidez da imagem devido à distribuição de intensidade do feixe no ponto focal.

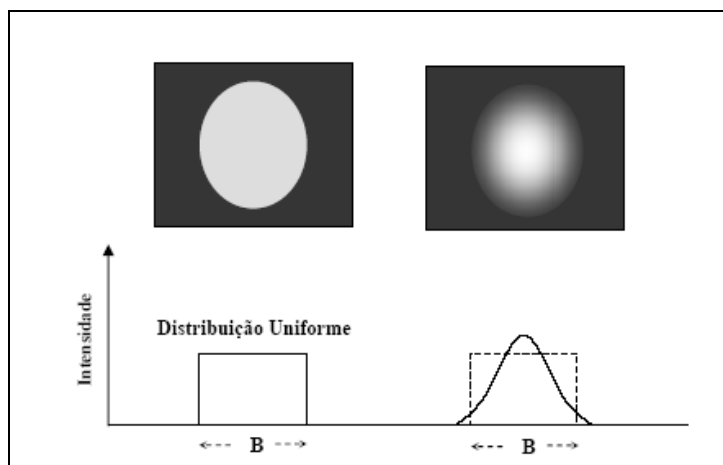


Figura 2.17 - Perda da nitidez devido a distribuição de intensidade do feixe no ponto focal (SPRAWLS, 1995)

B) Fatores Geométricos

Os fatores geométricos interferem na representação de estruturas na imagem, causando distorções, ampliação e indefinição de contornos. A distorção da imagem pode ser provocada pela distância inadequada do foco da fonte ao sistema de detecção da imagem e pela distância inadequada do foco ao objeto irradiado.

Quando o objeto irradiado está separado do sistema de detecção, a imagem deste tende a ser maior. Esta ampliação ou magnificação aumenta com o aumento da distância foco-detector ou com a aproximação do objeto irradiado em relação ao foco da fonte. Nas Figuras 2.18 e 2.19 são mostradas essas duas situações, em que a magnificação aumenta a indefinição das bordas das estruturas na imagem.

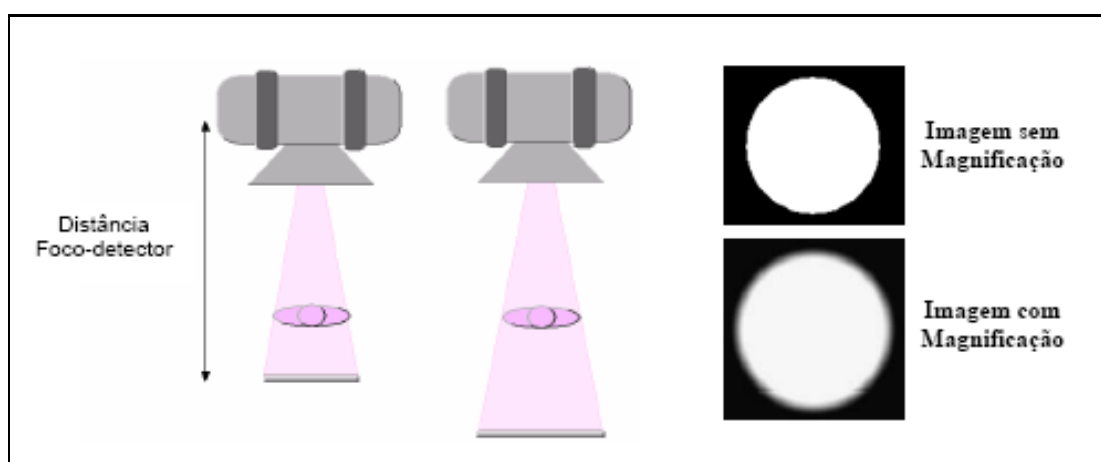


Figura 2.18 - Ampliação da imagem em função de distâncias foco-detector diferentes (SPRAWLS, 1995)

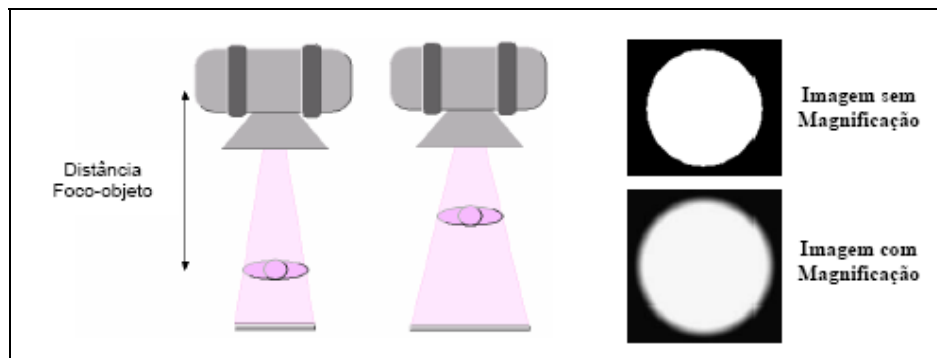


Figura 2.19 - Ampliação da imagem em função de distâncias foco-objeto diferentes (SPRAWLS, 1995)

Outra importante causa de distorção da imagem é o não alinhamento do eixo central do feixe com o objeto. As partes do objeto fora do centro do feixe sofrem maior distorção (SPRAWLS, 1995). Na Figura 2.20 é mostrada a distorção de uma imagem, causada pelo não alinhamento do eixo central do feixe com o objeto.

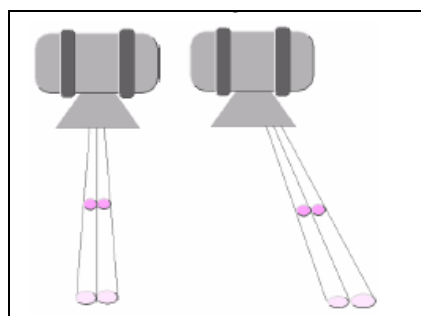


Figura 2.20 - Distorção causada pelo não alinhamento do eixo central do feixe (SPRAWLS, 1995)

C) Tamanho Finito do Ponto Focal

Quanto maior é o tamanho focal de uma fonte de radiação maior será a indefinição das bordas estruturais da imagem, principalmente quando houver magnificação (SPRAWLS, 1995).

2.3.1.4 Ruído

O ruído são variações aleatórias de intensidade no sinal da imagem, que contribuem para redução de visualização de detalhes, especialmente de objetos pequenos e de baixo contraste. O ruído da imagem possui diversas origens. A própria maneira aleatória que os fótons de radiação são distribuídos no processo de formação da imagem é uma fonte de ruído, denominado ruído quântico.

Existem vários tipos de fontes de ruídos que podem contribuir para o ruído geral na imagem final, contudo serão mencionados apenas os mais importantes.

Ruído de Quanta nos Raios X - A variação randômica dos raios X, ao ser absorvida pelo receptor PSP, determina o componente do ruído de quanta. Mesmo quando exposto a um feixe de raios X uniforme, o número de quanta absorvido por unidade de área na placa fosforescente varia, conforme a distribuição de Poisson. Quanto menor o número de fótons absorvidos, maior o grau de flutuação.

Ruído de Luminescência - A variação da luminescência estimulada durante o processo de leitura contribui significativamente para a variação na saída do sinal. Essa flutuação é causada pelo número de fótons gerados no IP. O ruído de luminescência é inversamente proporcional ao número de fótons e depende também de vários outros fatores tais como, a energia dos raios X incidente, a quantidade de luminescência fotoestimulada na placa, a eficiência do guia coletor de luz, a estabilidade do *laser* e a eficiência do conversor fotomultiplicador.

Ruídos da Estrutura do IP - Esse tipo de ruído é causado pela irregularidade da camada interna do IP. Para uma diminuição desse ruído é importante que a granulação do mesmo seja a menor possível e que tenha uma distribuição uniforme.

Ruídos de Quantização - Ruídos de quantização adicionam incerteza na determinação dos sinais digitais discretos. Este tipo de ruído é dependente da quantidade de bits utilizado no processo de conversão analógica – digital.

Ruídos Eletrônicos - Ruídos eletrônicos causam degradação no sinal de saída, durante todo o processo, contudo com maior intensidade no processo de conversão fotoelétrica. Na Figura 2.21 pode-se observar a contribuição dos ruídos durante todo o processo de obtenção de uma imagem radiográfica.

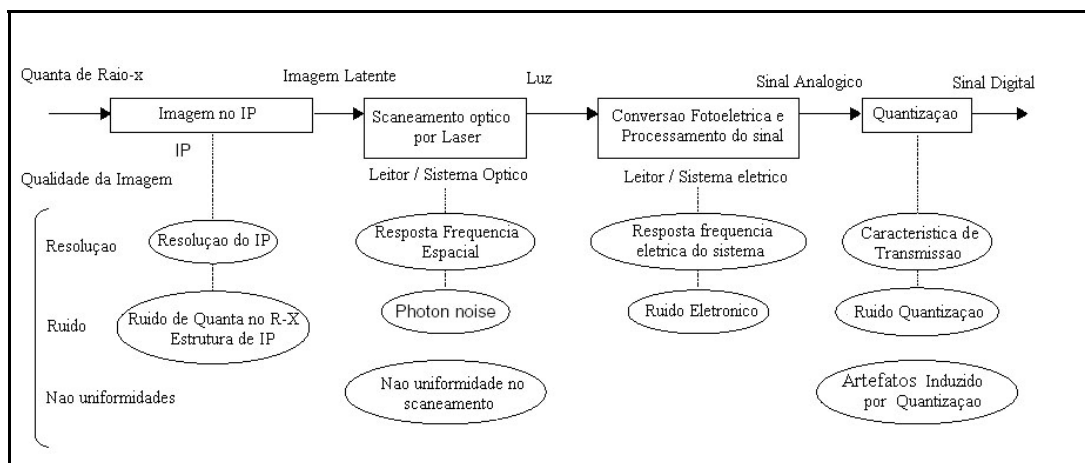


Figura 2.21 - Contribuição de ruído durante todo o processo de obtenção da radiografia (SILVA *et al.*, 2000)

2.3.1.5 – Razão Sinal Ruído (SNR)

Como mencionado anteriormente, o ruído em um sistema eletrônico ou digital é qualquer sinal indesejado que interfere na detecção ou processamento do sinal desejado. Este ruído degrada o desempenho do sistema, então é importante determinar a razão entre o sinal desejado e o indesejado, ou a razão sinal ruído. Quanto maior for esta razão, maior qualidade de visualização de detalhes a imagem apresentará.

Em uma imagem digital, a razão sinal ruído pode ser calculada através da razão entre a média da intensidade do sinal de certa região da imagem e seu respectivo desvio padrão, obtidos a partir dos programas de processamento de imagem. A SNR é calculada pela equação 2.3.

$$SNR = \frac{S}{\sigma} \quad (2.3)$$

Tal que,
$$S = \frac{1}{ixj} \sum_{i,j} X_{i,j} = \bar{X} \quad \text{e} \quad \sigma = \sqrt{\frac{(X_{i,j} - \bar{X})^2}{(ixj) - 1}} \quad (2.4)$$

onde, i e j são respectivamente o número de linhas e colunas da área utilizada para determinar a SNR, $X_{i,j}$ são os valores de intensidade de cada ponto e \bar{X} é a média desses valores.

2.3.2 Processamento da Imagem Digital

A imagem digital é na realidade um suporte físico que carrega informação. Processar uma imagem consiste em transformá-la sucessivamente com o objetivo de extrair mais facilmente a informação. O processamento de imagens é uma ciência que permite modificar, analisar e manipular imagens digitais a partir de um computador.

As funções de processamento de imagens digitais podem ser classificadas em duas, por escopo, que está relacionado com técnicas de processamento ou por resultado, que está relacionado com os tipos de resultado de cada técnica (SCURI, 1999). Através do diagrama mostrando na Figura 2.22 pode-se ter uma idéia melhor das classes de processamento por resultado.

A qualidade é um fator comum em todas as classes de processamento. Existem duas subdivisões em qualidade de imagem: fidelidade e inteligibilidade. No primeiro caso, a preocupação é em aproximar a imagem processada da imagem original ou de um padrão estipulado que a melhor represente. No segundo caso a preocupação é com a informação extraída da imagem, seja pelo olho humano, seja por algum processamento (SCURI, 1999).

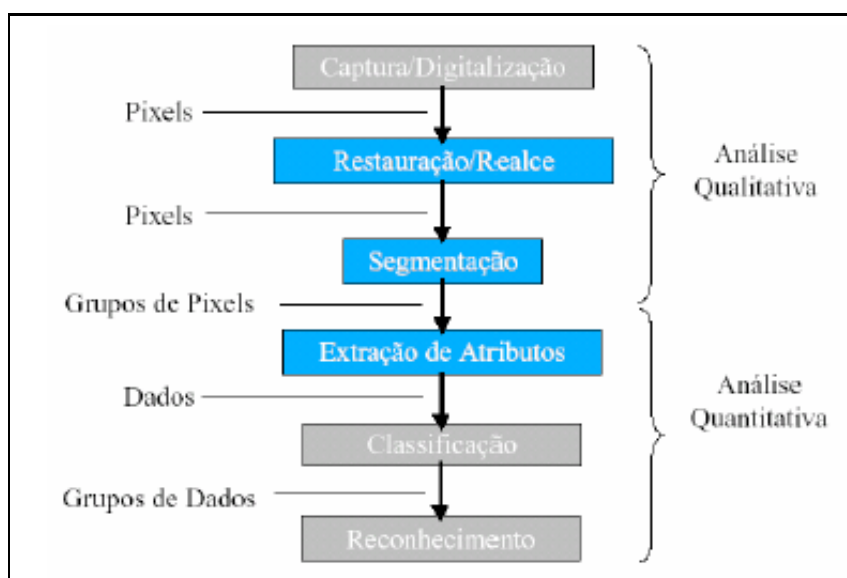


Figura 2.22 - Diagrama de sequência do processamento digital (SCURI, 1999)

2.3.2.1 Restauração/Realce

A restauração busca compensar distorções específicas, normalmente geradas no momento da aquisição. Quando se pode identificar experimentalmente a função que representa a deformação ou construir um modelo matemático adequado, é possível buscar a função inversa e aplicá-la sobre a imagem deformada. Por exemplo: correção de foco, imagens borradas por movimento. Em todos os casos, a formulação matemática envolvida é extremamente complexa e o custo computacional muito alto. Os resultados podem ter consequências somente qualitativas (SCURI, 1999).

2.3.2.2 Segmentação e Extração de Atributos

No contexto de processamento de imagens científicas, é comum buscar dados relacionados com os objetos presentes na imagem. Para isso, são necessárias as operações de Segmentação, que procuram isolar regiões de *pixels* e operações de Extração de Atributos, que focam nessas regiões e calculam uma série de parâmetros que as descreverão (SCURI, 1999).

2.3.2.3 Classificação

Uma vez com os parâmetros descritos acima coletados, pode-se distinguir objetos na imagem agrupando parâmetros de acordo com sua semelhança para cada região de *pixels* encontrada. Feita a classificação dos parâmetros, pode-se tomar decisões e relatar fatos relacionados com os objetos do mundo real, ponderando sempre através de uma medida de erro da classificação.

A palavra classificação não denota nenhum juízo de valor, mas apenas o agrupamento em classes dos diversos objetos obtidos na segmentação, cujos atributos já foram medidos. Em geral, vários atributos são necessários para uma correta classificação. Mas, quanto mais atributos, mais complexo se torna o problema. Desta forma, é muito importante realizar uma seleção adequada dos atributos disponíveis, visando otimizar o processo (SCURI, 1999).

2.3.2.4 Operações Pontuais

Operações pontuais são operações em que um *pixel* da imagem resultante depende apenas do mesmo *pixel* na imagem original (Figura 2.23). Neste caso a única informação fornecida é a cor do *pixel*, por isso muitas das operações pontuais são operações que alteram características de cor e luminância, tais como: brilho, contraste, nível de branco e nível de preto, saturação, dentre outros.

Qualquer operação pontual pode ser visualizada como um mapeamento de *pixels* da imagem original para a imagem processada. E isso é facilmente representado como um gráfico que relaciona as tonalidades disponíveis na imagem original com as tonalidades disponíveis na imagem processada.

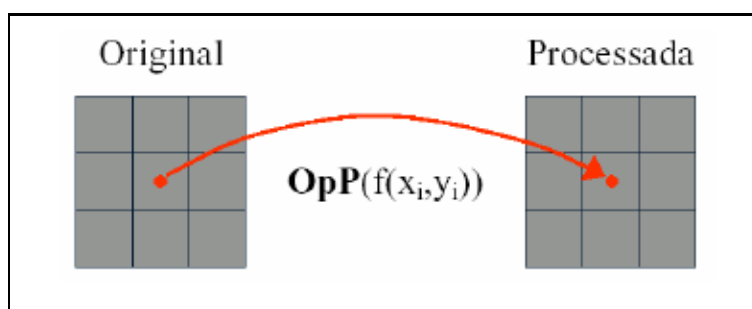


Figura 2.23 - Operações pontuais na imagem digital (SCURI, 1999)

As operações pontuais que envolvem apenas uma imagem original são chamadas de unárias, e as operações que usam mais de uma imagem original, são chamadas de binárias, ternárias, etc. Um exemplo de operação pontual com várias imagens é a média de várias imagens capturadas na mesma posição, é uma técnica comum de eliminação de ruído. Mas as operações binárias mais comuns são as operações aritméticas de soma, subtração e divisão de duas ou mais imagens.

Embora as funções pontuais estejam restritas somente ao *pixel* que está sendo processado, o processamento em si pode levar em consideração dados globais da imagem, como por exemplo, o histograma. O histograma é uma função estatística da imagem que para cada nível de tonalidade, calcula quantos *pixels* existem naquela tonalidade. Muitas operações pontuais usam o histograma como parâmetro de decisão para fornecer resultados diferentes para o *pixel* da imagem processada (SCURI, 1999).

2.3.2.5 Operações Locais

Operações locais são operações em que um *pixel* da imagem resultante depende de uma vizinhança do mesmo *pixel* na imagem original (Figura 2.24). As operações que realizam deformações no *grid* de *pixels* utilizam a técnica de interpolação para encontrar o novo ponto. A técnica de interpolação não deixa de ser uma operação local que depende apenas de uma vizinhança, embora algumas técnicas de interpolação muito sofisticadas e em geral muito lentas usam uma vizinhança bem extensa.

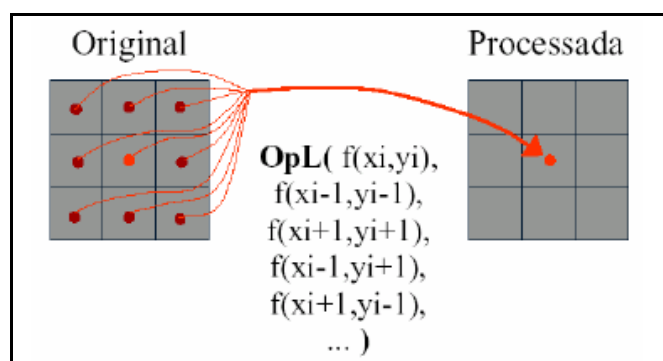


Figura 2.24 - Operações locais (SCURI, 1999)

2.3.2.6 Operações Globais

Operações globais são operações em que um *pixel* da imagem resultante depende de um processamento realizado em todos os *pixels* da imagem original. Neste grupo de operações estão as transformadas de domínio, tais como a Transformada de Fourier, a Transformada de Wavelets e a Transformada de Hough (SCURI, 1999).

2.3.3 Software

Existem diversos sistemas de processamento de imagens disponíveis no mercado. Eles se distinguem pela forma de distribuição (Comercial, *Shareware*, *Freeware*), pela área de aplicação (edição eletrônica, análise científica, visualização, edição informal, pesquisa) e pelas plataformas em que estão disponíveis (UNIX, Windows, MAC) (SCURI, 1999).

Geralmente os sistemas de radiografia computadorizada fornecem programas próprios de processamento de imagem que permitem diversas operações de análise com a imagem gerada após o processamento do *scanner*, tais como inversão na escala de cor da imagem, realce de bordas (imagem em relevo), redução de ruído, medição de descontinuidades na imagem e, inclusive, geração de relatórios finais.

2.4 Radiografia Convencional

A radiografia convencional utiliza como detector sensível à radiação o filme radiográfico, que é composto de uma emulsão e uma base. A emulsão consiste em uma camada muito fina (espessura de 0,025 mm) de gelatina, que contém um grande número de minúsculos cristais de brometo de prata. A emulsão é colocada sobre um suporte, denominado base, que é feito geralmente de um derivado de celulose, transparente e de cor levemente azulada.

Uma característica dos filmes radiográficos é que, ao contrário dos filmes fotográficos, eles possuem a emulsão em ambos os lados da base, conforme mostrado na Figura 2.25. Os cristais de brometo de prata, presentes na emulsão, possuem a propriedade de, quando atingidos pela radiação ou luz, tornarem-se susceptíveis de reagir com um produto químico denominado revelador. O revelador atua sobre esses cristais provocando uma reação de redução que resulta em prata metálica negra (MOREIRA, 2007).

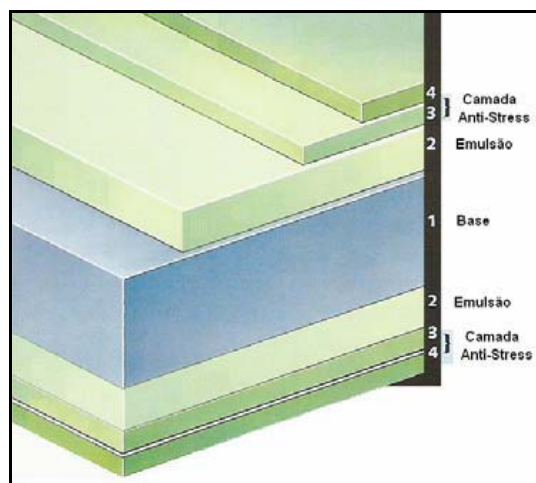


Figura 2.25 - Camada dos filmes radiográficos (SCHUBERT, 2005)

Os locais do filme, atingidos por uma quantidade maior de radiação, apresentarão, após a ação do revelador, um número maior de grãos negros que as regiões atingidas por radiação de menor intensidade. Dessa forma, quando vistos sob a ação de uma fonte de luz, os filmes apresentarão áreas mais escuras e mais claras que irão compor a imagem do objeto radiografado (SCHMIDT, 2004).

A imagem formada no filme radiográfico possui áreas claras e escuras, evidenciando certo grau de enegrecimento que é denominada de densidade óptica. Matematicamente a densidade óptica é expressa como sendo o logaritmo da razão entre a intensidade de luz visível que incide no filme e a intensidade que é transmitida.

2.4.1 Processamento do Filme Radiográfico

O processamento do filme radiográfico deve seguir algumas considerações gerais, necessárias ao bom desempenho desta tarefa. No manuseio do filme, a limpeza é essencial. A câmara escura e os acessórios e equipamentos devem ser mantidos rigorosamente limpos, e usados somente para o propósito aos quais eles se destinam. Os banhos de processamento e a revelação devem ser controlados, quanto à temperatura e tempo de duração de acordo com a recomendação do fabricante, e podem ser processados manualmente ou em processadoras automáticas.

Ambos os processamentos são compostos por uma série de banhos que se relata a seguir:

Revelação: Quando um filme exposto é imerso no tanque contendo o revelador, esta solução age sobre os cristais de brometo de prata metálica. Esta seletividade está na capacidade de discriminar os grãos expostos dos não expostos. Devido a fatores eletroquímicos, as moléculas dos agentes reveladores atingem os cristais, que ficam como que revestidos. A visibilidade da imagem e, conseqüentemente, o contraste, a densidade de fundo e a definição dependem do tipo de revelador usado, do tempo de revelação e da temperatura do revelador. Desta forma, o controle tempo-temperatura é de fundamental importância para se obter uma radiografia de boa qualidade. A revelação deve ser feita com agitação permanente do filme no revelador, a fim de que se

obtenha uma distribuição homogênea do líquido em ambos os lados da emulsão, evitando-se a sedimentação do brometo e outros sais que podem provocar manchas susceptíveis de mascarar possíveis descontinuidades (**KODAK, 1980**).

Banho de parada: Quando o filme é removido da solução de revelação, uma parte do revelador fica em contato com ambas as faces do filme, fazendo, dessa forma, com que a reação de revelação continue. O banho interruptor tem, então, a função de interromper esta reação a partir da remoção do revelador residual (**KODAK, 1980**).

Fixação: Após o banho de parada, o filme é colocado em um terceiro tanque, que contém uma solução chamada de “fixador”. A função da fixação é remover o brometo de prata das porções não expostas do filme, sem afetar os que foram expostos à radiação. O fixador tem também a função de endurecer a emulsão gelatinosa, permitindo a secagem ao ar aquecido. O tempo de fixação normalmente não deve exceder a 15 minutos. Os filmes devem ser agitados quando colocados no fixador durante pelo menos 2 minutos, para garantir uma ação uniforme deste. O fixador deve ser mantido a uma temperatura igual ao do revelador, ou seja, cerca de 20°C (**KODAK, 1980**).

Lavagem dos filmes: Após a fixação, os filmes seguem para o processo de lavagem para remover o fixador da emulsão. Cada filme deve ser lavado por um período de, aproximadamente, 30 minutos. A temperatura da água no tanque de lavagem é um fator muito importante a ser considerado, e os melhores resultados são obtidos com a temperatura por volta de 20°C (**KODAK, 1980**).

O processamento automático é utilizado quando há grande volume de trabalho, pois só assim torna-se econômico. O manuseio só é utilizado para carregamento e descarregamento de filmes. O ciclo de processamento é inferior a 15 minutos. Quando adequadamente mantido e operado, este equipamento produz radiografia de alta qualidade. A alta velocidade de processamento torna-se possível pelo uso de soluções químicas especiais, contínua agitação dos filmes, manutenção da temperatura das soluções e secagem por jatos de ar aquecido.

2.5 Radiografia Computadorizada

A radiografia computadorizada (RC) é a técnica utilizada na aquisição da imagem digital que utiliza o *Image Plate* (IP) como detector sensível à radiação.

2.5.1 Estrutura Física do IP

O IP é composto de quatro camadas: camada protetora, “camada de fósforo”, suporte de poliéster e reforço de controle da curvatura. A Figura 2.26 mostra como essas diversas camadas são distribuídas na placa de aquisição da imagem computadorizada.

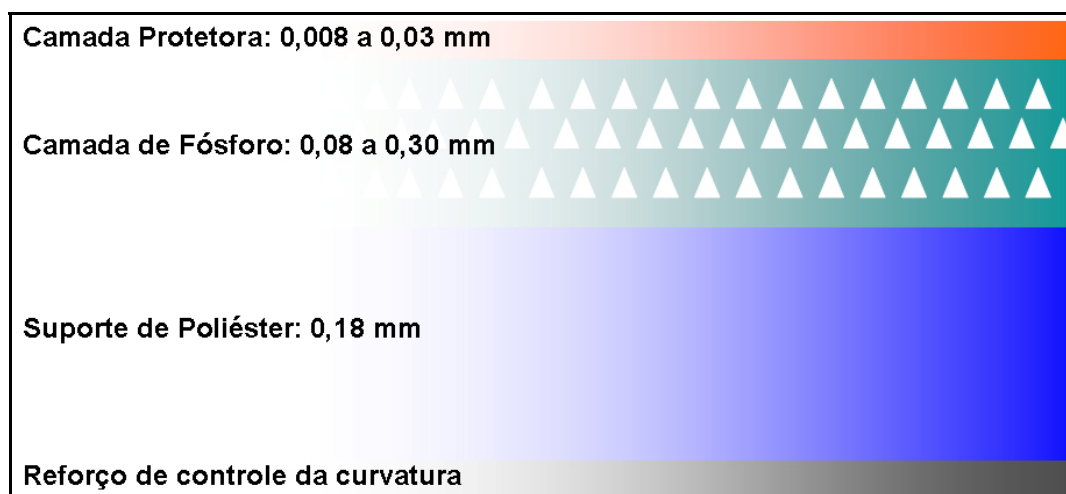


Figura 2.26 - Estrutura Física do IP (MANGO, 2004)

A camada protetora tem a função de proteger a superfície da placa de fósforo contra arranhões e degradações do meio ambiente, enquanto a camada de reforço proporciona controle contra a curvatura, permitindo seu transporte correto pelos sistemas de leitura.

Apesar da natureza robusta das placas de fósforo, é preciso manuseá-las com cuidado, em ambiente limpo e de acordo com as normas dos fabricantes para obter delas o desempenho e o tempo de vida ótimos que elas oferecem (MANGO, 2004).

2.5.2 Princípio Físico do IP

A aquisição da imagem no IP ocorre em duas etapas: primeiro há a criação da imagem latente e, em seguida, há a transformação dessa imagem latente em imagem radiográfica digital.

A criação da imagem latente no IP se baseia nos níveis de energia dos elétrons numa rede cristalina. Os elétrons se encontram normalmente ligados aos íons de Eu^{+2} , em uma faixa de energia denominada banda de valência. A radiação, ao interagir com a estrutura cristalina do IP, oxida os íons de Eu^{+2} transformando-os em Eu^{+3} e o elétron é elevado a um nível de energia maior, denominado banda de condução. Os elétrons tendem a retornar a seu estado fundamental e, para isso, liberam energia no mínimo igual à diferença entre os dois estados de energia envolvidos na transição (banda de valência e condução, em torno de 8,3 eV). Entretanto, a produção de radiação eletromagnética neste processo é bastante ineficiente, sendo a energia normalmente liberada sob a forma de calor e, mesmo se isso não ocorrer os fótons produzidos estão fora da faixa de luz visível.

Para tornar este processo mais eficiente, durante o processo de fabricação, são introduzidos no cristal impurezas ou ativadores que criam níveis de energia entre a banda de valência e de condução. Esses defeitos são também conhecidos como F-centros ou centros de cor. Por possuírem um potencial de ionização inferior ao do cristal, esses centros passam a capturar os elétrons que saem da banda de valência. Os F-centros são metaestáveis de modo que os elétrons capturados possam ser novamente apanhados pelo Eu^{+3} (MANGO, 2004).

No processo de luminescência fotoestimulável necessita-se de um segundo estímulo. Como os centros de cor absorvem energia quando irradiados com laser vermelho (700 nm), para ler a imagem utiliza-se tipicamente um feixe direcionado de laser de He-Ne. A absorção da energia do laser pelos centros de cor libera elétrons presos com consequente emissão de luz azul (390 nm) quando esses elétrons liberados se recombinam com as lacunas nos lugares ocupados pelo Eu^{+2} , voltando então às suas posições de valência originais. A intensidade da emissão é proporcional à carga presa,

que por sua vez é proporcional à absorção original dos raios X (TAKAHASHI, 2002).

Os fótons de luminescência possuem comprimentos de onda diferentes dos fótons do laser estimulante. Para evitar que os fótons do laser estimulante sejam transformados em um sinal eletrônico são usados filtros óticos que somente transmitem fótons de luminescência (TAKAHASHI, 2002).

A velocidade com a qual a varredura é feita com o laser sobre a placa é ajustada de acordo com o tempo de decaimento do sinal luminescente ($0,8 \mu\text{s}$ para o BaFBr:Eu²⁺), que é um dos principais fatores limitantes para o tempo de leitura do IP.

A potência do feixe do laser determina que fração de energia armazenada será liberada, gerando impactos no tempo de varredura, no efeito de atraso fosforescente e nos sinais residuais. Lasers com potências altas podem liberar mais elétrons aprisionados, mas em troca há uma perda na resolução espacial, causada pelo aumento da penetração do feixe do laser aumentando o espalhamento da luz estimulada na camada do fósforo. Para garantir que somente os fótons de luminescência sejam coletados pelo sistema, é utilizado um filtro ótico especial, destinado a bloquear a luz estimuladora, que tem uma intensidade muito maior que a luz emitida pelo IP.

A leitura do IP é realizada linha a linha, e no final de cada linha o feixe retorna ao início da próxima linha. Como a placa do fósforo está se movendo simultaneamente, a velocidade de translação é ajustada de modo que a próxima varredura do feixe do laser inicie com um espaçamento igual ao tamanho de pixel, garantindo que dimensões de amostra sejam iguais nas direções x e y (MANGO, 2004) (ROUSSILHE *et al.*, 2007).

Durante a leitura, nem toda a energia armazenada na tela é liberada. Para garantir a remoção completa de toda imagem latente, o IP é apagado com uma luz de alta intensidade, que a ilumina por um curto período, permitindo assim que ela seja reutilizada em outras exposições (OLIVEIRA, 2010). A etapa do apagamento pode ser realizada no leitor RC (desde que este possua um sistema de apagamento acoplado) ou em um equipamento à parte. Na Figura 2.27 pode ser visto o ciclo do IP.

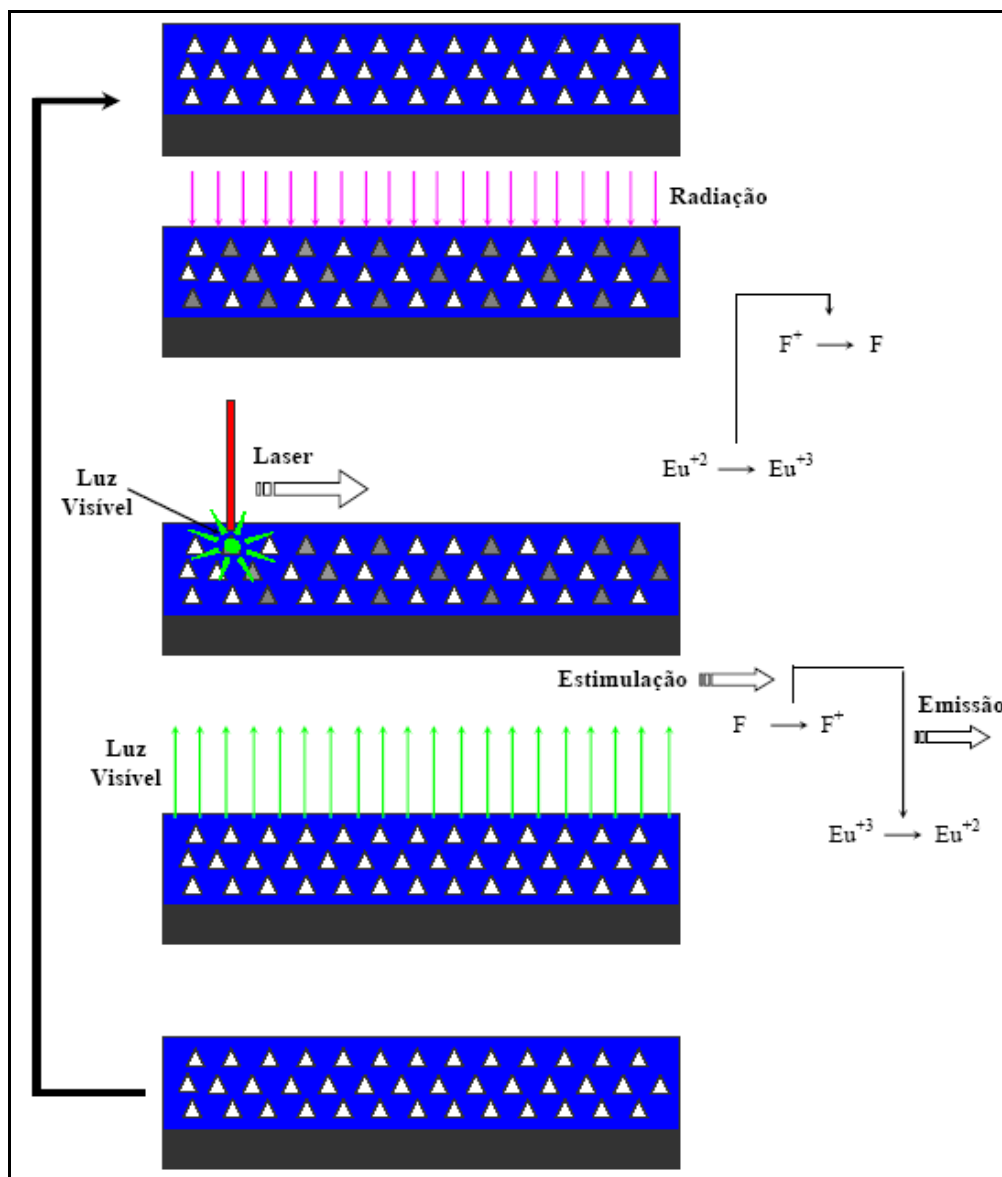


Figura 2.27 - Ilustração do processo de formação da Imagem (OLIVEIRA, 2010)

2.5.3 O Leitor da Radiografia Computadorizada

O leitor da radiografia computadorizada é um dispositivo eletromecânico que incorpora todas as funções necessárias para a extração da imagem latente e reconstrução/exibição da radiografia final (OLIVEIRA, 2010).

Em termos de recursos, existe uma certa variação de fabricante para fabricante, mas todos os leitores realizam as seguintes funções básicas: um sistema de alimentação aceita o IP numa velocidade uniforme; um sistema de transporte o conduz através de um *scanner* com feixe de laser estimulador; a luminescência fotoestimulada é coletada por

um filtro que faz a separação da fotoestimulação contra o espectro da luminescência, uma vez que o feixe de estimulação é várias ordens de grandeza mais intenso que a luminescência (dados da imagem); em seguida, um fotomultiplicador/detector amplifica o sinal; o sinal análogo é convertido em digital e o computador armazena a imagem para as operações subsequentes, como exibição, inserção de anotações, análise, medição, armazenamento, etc. Um esquema desse processo de leitura do IP pode ser visto na Figura 2.28.

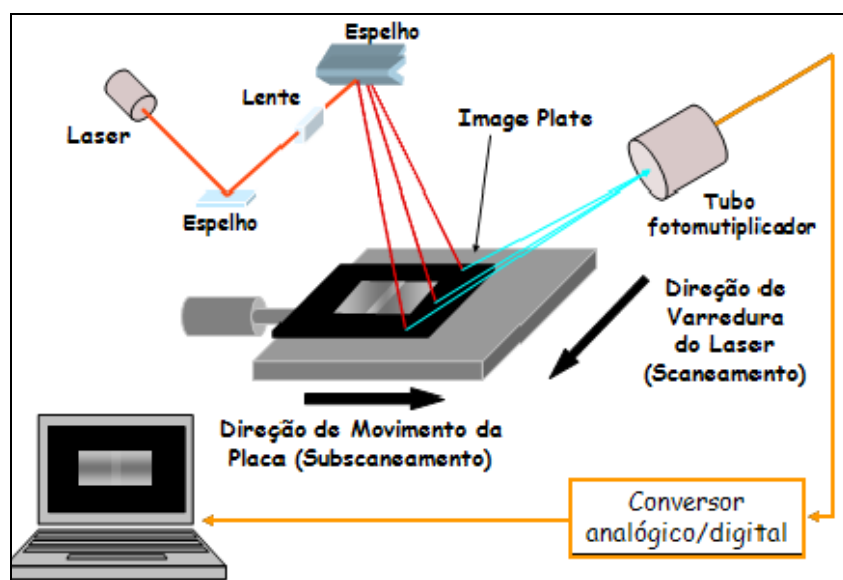


Figura 2.28 – Esquema do processo de leitura do IP (NASCIMENTO, 2012)

2.5.3.1 Detecção e Conversão do Sinal Fotoestimulado

O sinal fotoestimulado é emitido em todas as direções a partir do fósforo. Desta forma um sistema de captura óptica (guia coletor de luz) é posicionado na interface placa-laser ao longo de toda direção de leitura do IP, de modo a capturar uma porção da luz emitida e a direcionar ao catodo de uma fotomultiplicadora (PMT), que tem como função básica coletar a luz produzida na luminescência e transformá-la em pulsos de corrente elétrica. Os componentes básicos de uma fotomultiplicadora estão apresentados na Figura 2.29.

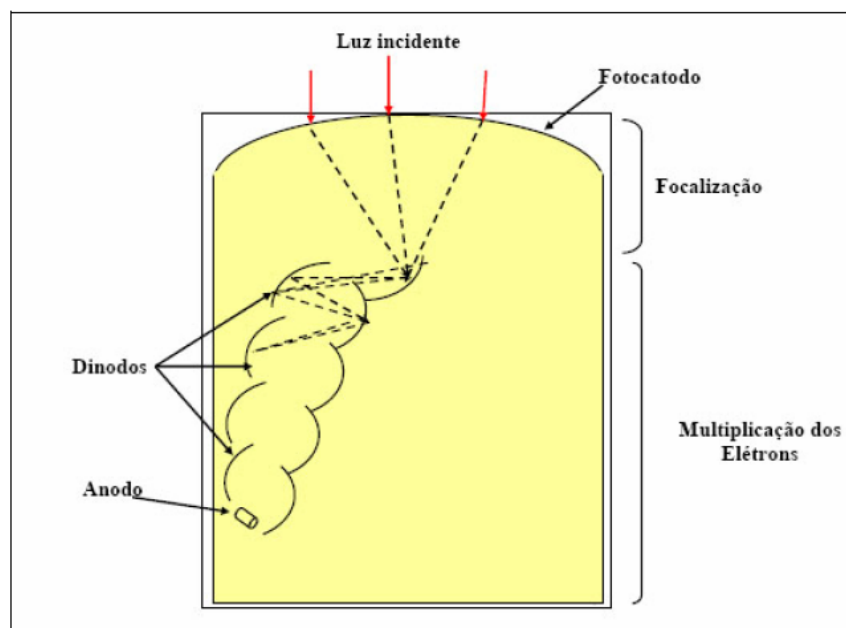


Figura 2.29 - Elementos básicos de uma fotomultiplicadora (OLIVEIRA, 2004)

A sensibilidade da janela do fotocátodo é ajustada de modo que somente o comprimento de onda correspondente à luz emitida (390 nm) seja capturado, descartando assim a possibilidade de absorção de fótons de outros comprimentos de onda.

Os fóton-elétrons emitidos pelo catodo são acelerados e amplificados através de uma série de dinodos dentro da fotomultiplicadora. O ganho é dado pelos ajustes de acordo com a voltagem sobre os dinodos. Assim, um sinal de corrente útil é obtido na saída do tubo. Finalmente, os elétrons são coletados no anodo produzindo um pulso de corrente que pode ser medido por um circuito eletrônico apropriado.

2.5.3.2 Digitalização do Sinal

Para ocorrer a digitalização no sinal de saída do tubo fotomultiplicador, deve se determinar antes o máximo e o mínimo do sinal, de modo a se obter o melhor intervalo. Uma vez determinado o fator de ganho do tubo fotomultiplicador, o sinal é comprimido na saída do mesmo. A maioria dos sistemas comprime o sinal de saída com amplificadores analógicos – logarítmicos, onde é feita uma relação linear entre a exposição incidente e o sinal de saída ou amplificadores “*square root*”, onde é feita uma relação linear entre ruído do quanta associado à exposição (OLIVEIRA, 2004).

O processo de digitalização é feito em dois passos: amostragem e quantização. Na amostragem é determinada a localização e o tamanho do sinal fotoestimulado de uma área específica do receptor. Na quantificação é determinado o valor médio da amplitude do sinal na área.

A saída do tubo fotomultiplicador é medida em uma frequência temporal, coordenada com a taxa de varredura do laser, sendo quantizado a um valor inteiro e discreto dependente da amplitude do sinal e o número total de valores digitais possíveis. Um conversor analógico-digital (A/D) converte o sinal de saída do tubo fotomultiplicador a uma taxa muito mais rápida que a taxa de varredura do laser. Um dispositivo “*pixel clock*” coordena o tempo em que um sinal foi codificado com a posição física na linha de varredura. Dessa forma, é possível estabelecer uma relação entre o sinal e a posição em que ele foi gerado.

A razão entre a taxa de amostragem no conversor A/D e a varredura ao longo do caminho da reflexão do laser determina o tamanho do *pixel* na direção de leitura. A velocidade de translação é coordenada com tamanho do *pixel* também na direção de leitura. Dessa maneira, o espaçamento entre as linhas é igual à largura do *pixel*, obtendo assim *pixel* quadrado. Embora exista uma infinita possibilidade de valores de voltagens analógicos, entre o máximo e o mínimo na saída do tubo fotomultiplicador, o conversor A/D quebra o sinal em uma série de valores discretos, para codificar a amplitude do sinal. O número de bits utilizados para se aproximar do sinal analógico determina o número de valores discretos possíveis (OLIVEIRA, 2007).

2.6 Comparação entre as Técnicas Radiográficas Convencional e Computadorizada

Devido à sua alta sensibilidade radiográfica, os IPs são capazes de detectar radiações a baixos níveis, sendo capazes de formar imagem com tempo de exposição inferior do que com filmes convencionais. Porém, este fato os torna altamente vulneráveis a radiações espalhadas, que contribuem negativamente na qualidade da imagem (MACHADO, 2011) (NASCIMENTO, 2012).

As dimensões dos IPs estão limitadas a alguns tamanhos específicos disponíveis no mercado, de acordo com cada fabricante e tipo da unidade de leitura do mesmo. Já com filmes convencionais, é possível adaptar o seu tamanho às necessidades de cada ensaio.

Os IPs têm menor sensibilidade à luz do que os filmes convencionais, podendo inclusive realizar radiografias sem chassis, desde que no local não haja luz excessiva. Além disso, essas placas podem ser reutilizadas por milhares de vezes, desde que sua manipulação seja adequada para que não haja desgaste físico do mesmo.

Em sistemas de RC, a obtenção da imagem é dada pela leitura do IP com *laser*. Dessa forma, são eliminados a utilização de produtos químicos e água de lavagem, o que gera uma grande redução do impacto ambiental e de preocupações regulamentares.

Também nesta técnica, o número de níveis de cinza é dependente do número de bits usado para quantificação, geralmente 12 ou 16 bits, ou seja, 4096 ou 65536 níveis de cinza. No sistema de radiografia convencional esse número é limitado à visão humana, ou seja, 32 níveis de cinza.

A manipulação da imagem em sistemas de RC permite a possibilidade de múltiplas operações. Já na radiografia convencional, existe apenas a possibilidade de aumentar ou diminuir a intensidade do negatoscópio e a utilização de lupas e régua milimetradas para analisar as radiografias.

O sistema computadorizado apresenta uma faixa dinâmica com resposta linear com relação à dose de exposição e extremamente ampla, como pode ser visto na Figura 2.30. Isso permite a captura de imagens de objetos complexos numa única exposição, descartando a necessidade de realizar vários carregamentos de filme ou várias exposições (**MACHADO, 2011**).

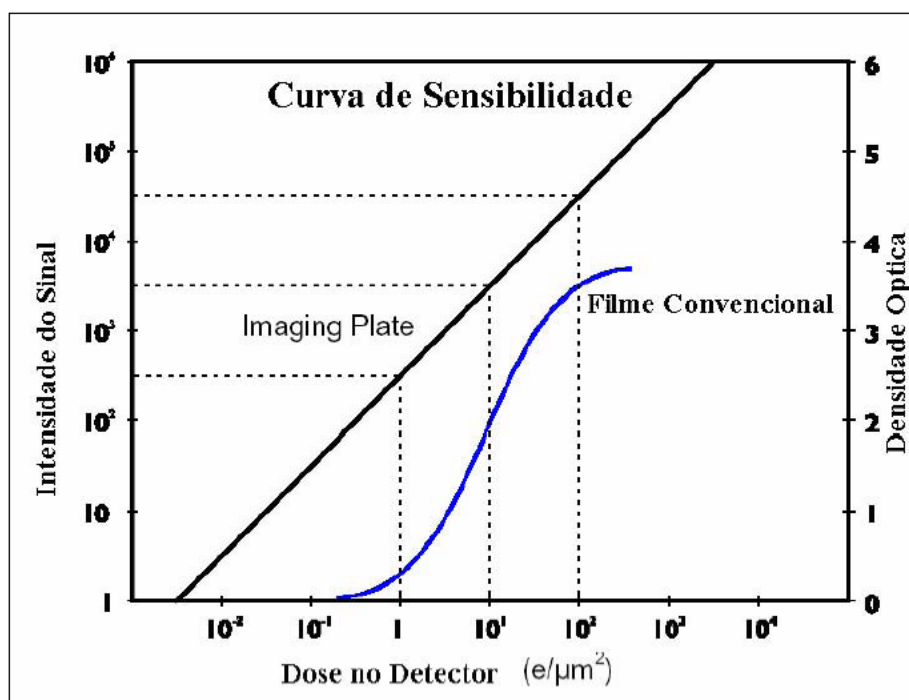


Figura 2.30 - Curva de resposta para uma placa de fósforo comparado com um filme de ISO 400 usando um écran de terra rara (MACHADO, 2011)

Na radiografia computadorizada é possível catalogar, gerenciar e armazenar as imagens eletronicamente, com a vantagem de exigir menor espaço físico e de ter um custo menor. Além disso, as imagens podem ser recuperadas numa fração do tempo dos sistemas tradicionais de filme, mais uma vez facilitando e agilizando a tomada de decisões e as análises. Assim deixa de existir um espaço dedicado ao armazenamento de filmes radiográficos, adaptado às suas necessidades. Além disso, as imagens digitais podem ser transmitidas através da rede para qualquer usuário, evitando a necessidade de se transportar fisicamente os filmes radiográficos.

2.7 Indicadores de Qualidade de Imagem - IQIs

Para que se possa julgar a qualidade da imagem de uma radiografia são empregadas pequenas peças chamadas Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI), que são colocadas sobre o objeto radiografado. O tipo ou norma de fabricação do IQI deve ser aquele que o projeto de construção do equipamento a ser radiografado exige (KODAK, 1980).

2.7.1 IQI de Fios - ISO

O IQI de fios é utilizado para se obter o contraste atingido pela imagem. O IQI fabricado conforme a norma **ISO 19232-1 (2004)** (Figura 2.31) é constituído por 7 fios, dispostos paralelamente, cujo material é radiograficamente similar ao material ensaiado. A relação entre o diâmetro do fio e seu número correspondente é descrito na norma indicada. Os fios foram divididos em três grupos, a saber: 1 a 7, 6 a 12, 10 a 16 e 13 a 19. Quanto maior o número, menor seu diâmetro, o que determina os níveis de qualidade especificados, conforme é apresentado na Tabela 2.4.

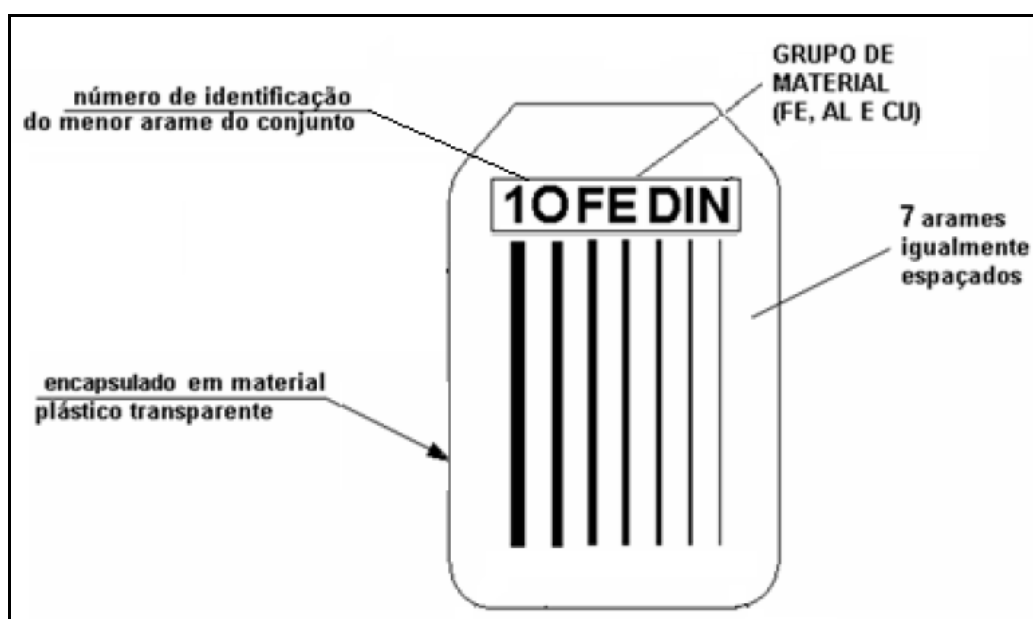


Figura 2.31 - IQI de Fio (ISO 19232-1, 2004)

Tabela 2.4 - Parâmetros do IQI de fios (ISO 19232-1, 2004)

Número	Diâmetro (mm)	Número	Diâmetro (mm)
1	3,20	11	0,32
2	2,50	12	0,25
3	2,00	13	0,20
4	1,60	14	0,16
5	1,25	15	0,125
6	1,00	16	0,100
7	0,80	17	0,080
8	0,63	18	0,063
9	0,50	19	0,050
10	0,40	-	-

Sempre que possível, o mesmo deve ser colocado sobre a solda de forma que os fios estejam perpendiculares à linha da solda e de forma que sua imagem apareça na zona central da radiografia (EN 462-1, 1994). O número da qualidade de imagem é o número do fio mais fino visível na radiografia. O valor requerido é definido para cada faixa de espessura de material. A classe de qualidade de imagem é função do rigor com que a inspeção deve ser feita e deve ser especificada pela norma do produto (ISO 19232-1, 2004) (AGFA, 1989).

2.7.2 IQI de Fio Duplo

O IQI de fio duplo é utilizado para se obter a resolução espacial do sistema (EN 462-5, 2004). Tal IQI consiste em uma barra de plástico, onde treze pares de fios metálicos são colocados conforme na Figura 2.32.

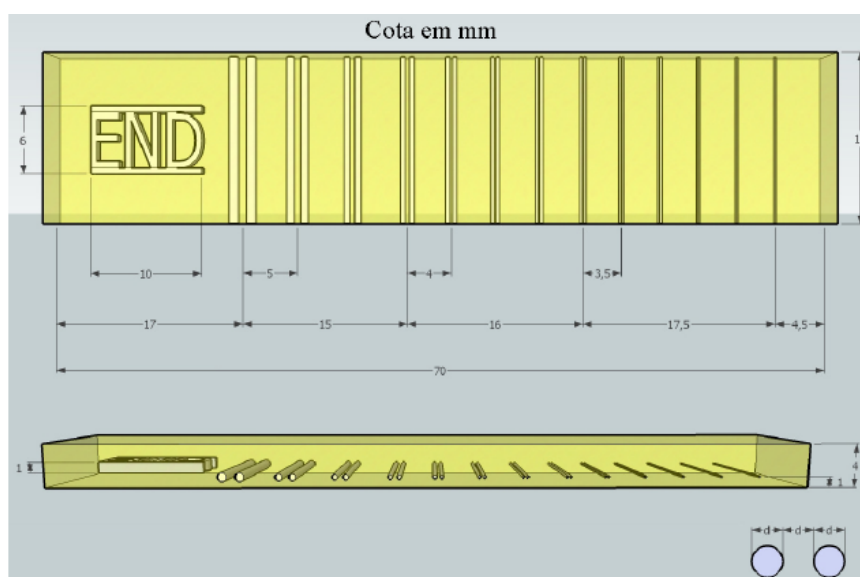


Figura 2.32 - IQI fio duplo (OLIVEIRA, 2010)

Os fios correspondentes aos números 1D à 3D são fabricados em tungstênio, os outros são fabricados em platina, e as dimensões devem corresponder ao especificado em norma (EN 462-5, 2004) (ISO 19232-5, 2004). O espaçamento entre os fios é igual ao diâmetro do mesmo. Na Tabela 2.5 pode ser encontrados a numeração dos elementos, a desfocagem geométrica correspondente, o espaçamento entre os fios, a tolerância permitida e o correspondente em pares de linha por milímetro (pl/mm).

Tabela 2.5 - Parâmetros do Indicador de Qualidade da Imagem de Fio Duplo (ISO 19232-5, 2004)

Elemento	Desfocagem Geométrica	Diâmetro do Fio	Tolerância	Pl/mm
13D	0,10	0,050		10,000
12D	0,13	0,063		7,936
11D	0,16	0,080	± 0,005	6,250
10D	0,20	0,100		5,000
9D	0,26	0,130		3,846
8D	0,32	0,160		3,125
7D	0,40	0,200		2,500
6D	0,50	0,250	± 0,01	2,000
5D	0,64	0,320		1,563
4D	0,80	0,400		1,250
3D	1,00	0,500		1,000
2D	1,26	0,630	± 0,02	0,794
1D	1,60	0,800		0,625

Para a obtenção da resolução espacial é necessário conhecer a Função de Transferência Modular (MTF), que é obtida a partir da radiografia do IQI de fio duplo e da aquisição do seu perfil na imagem, como mostrado na Figura 2.33. Com base no perfil de linha, faz-se uma leitura dos valores dos máximos e mínimos de intensidade correspondente a cada par de fios. Como a curva de MTF é uma curva normalizada, utiliza-se a variação do primeiro pulso para a normalização.

Dessa forma o primeiro par de fios corresponde a 1 (100%) e os outros serão menor que um, uma vez que, com o aumento da frequência fica mais difícil se identificar a separação entre os pares de fios. Então, com os valores normalizados correspondentes a cada par de fios, é plotada uma curva do número do par de fio (pl/mm) em função da MTF (ISO 19232-5, 2004).

A partir desta curva é lido o correspondente em pares de linhas por milímetro para uma MTF de 0,2 (20%). Então o valor obtido é finalmente utilizado na equação 2.5, obtendo assim o valor da resolução espacial do sistema.

$$SR = \frac{1}{2MTF_{20\%}} \quad (2.5)$$

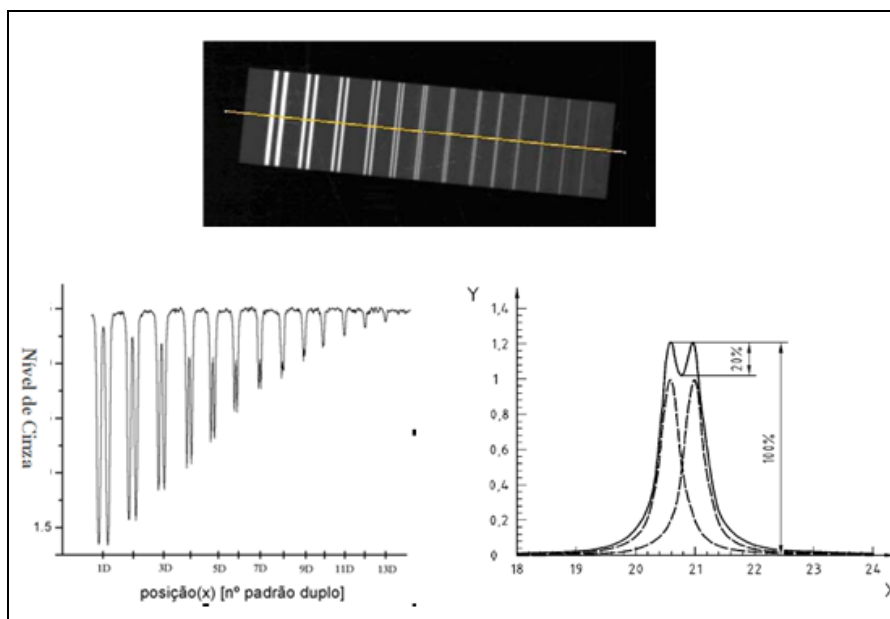


Figura 2.33 - Perfil de linha do IQI de fio duplo (OLIVEIRA, 2004)

2.8 Técnicas de Exposição

2.8.1 Técnica de Parede Simples Vista Simples (PSVS)

Essa técnica é assim chamada, pois no arranjo entre a fonte de radiação, peça e filme, somente a seção da peça que está próxima ao filme será inspecionada e a projeção será em apenas uma espessura do material (ABENDI, 2005) (TAUHATA *et al.*, 2003), conforme apresentado na Figura 2.34.

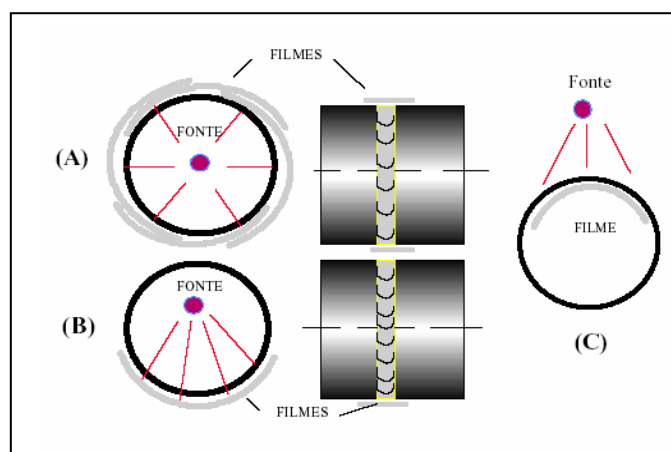


Figura 2.34 - Técnica de exposição Parede Simples Vista Simples (ABENDI, 2005)

2.8.2 Exposição panorâmica

Esta técnica constitui um caso particular da técnica de Parede Simples Vista Simples descrita anteriormente, que proporciona alta produtividade em rapidez em um exame de juntas soldadas circulares com acesso interno, conforme indicado na Figura 2.34 (A).

Na técnica panorâmica, a fonte de radiação deve ser centralizada no ponto geométrico equidistante das peças e dos filmes, ou no caso de juntas soldadas circulares a fonte deve ser posicionada no centro da circunferência. Com isso, em uma única exposição da fonte, todos os filmes dispostos a 360 graus serão igualmente irradiados, possibilitando, assim, o exame completo das peças ou das juntas (ABENDI, 2005).

2.8.3 Técnica de Parede Dupla Vista Simples (PDVS)

Nesta técnica de Parede Dupla Vista Simples, o feixe de radiação, proveniente da fonte, atravessa duas espessuras da peça, entretanto, projeta no filme somente a seção da peça que está mais próxima ao mesmo. Frequentemente esta técnica é utilizada em inspeções de juntas soldadas, as quais não possuem acesso interno, por exemplo, tubulações com diâmetros maiores que 3½ polegadas, vasos fechados e outros. É importante lembrar que esta técnica requer que a radiação atravessa duas espessuras da peça e, portanto, o tempo de exposição será maior que a inspeção pela técnica de parede simples (ABENDI, 2005) (TAUHATA *et al.*, 2003). Assim, esta opção deverá ser selecionada quando outra técnica não for possível ou permitida, conforme apresentado na Figura 2.35.

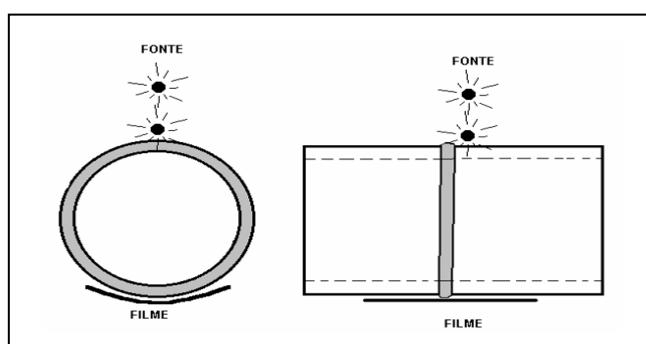


Figura 2.35 - Técnica de exposição parede dupla vista simples (ABENDI, 2005)

2.8.4 Técnica de Parede Dupla Vista Dupla (PDVD)

Neste caso, o feixe de radiação proveniente da fonte também atravessa duas espessuras, entretanto, projetará no filme a imagem de duas seções da peça, e serão objetos de interesse, conforme ilustrado na Figura 2.36 (ABENDI, 2005).

Nesta técnica, no cálculo do tempo de exposição devem ser levadas em conta as duas espessuras das paredes que serão atravessadas pela radiação. A técnica de Parede Dupla Vista Dupla (PDVD) é frequentemente usada para inspeção de juntas soldadas em tubulações com diâmetros menores que 3½ polegadas.

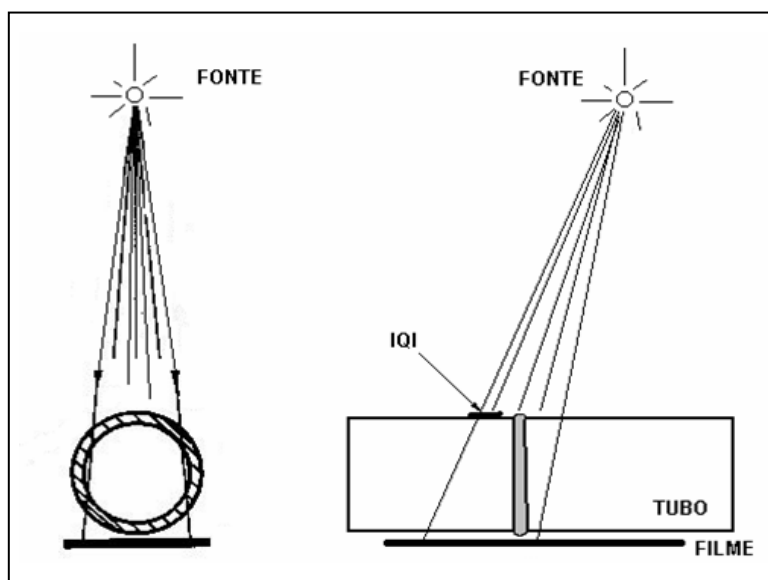


Figura 2.36 - Técnica de exposição parede dupla vista dupla (ABENDI, 2005)

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os corpos de prova e equipamentos utilizados neste trabalho, assim como a metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo proposto.

3.1 Materiais e Equipamentos

3.1.1 Corpos de Prova

Os corpos de prova (CPs) analisados consistem em chapas de aço de diferentes espessuras e soldadas na posição plana, como mostra a Figura 3.1. Foram provocados defeitos artificiais em cada uma delas para análise da detectabilidade. Ao todo foram radiografados 31 CPs, divididos em oito grupos, de acordo com a Tabela 3.1.



Figura 3.1 – Fotografia dos corpos de prova

Tabela 3.1 – Especificações dos corpos de prova

Grupo	Quantidade de CPs	Espessura Nominal (mm)	Espessura do Reforço (mm)	Espessura Total (mm)
I	3	5,33	1,60	6,93
II	3	6,35	1,60	7,95
III	3	7,11	3,20	10,31
IV	4	9,53	3,20	12,73
V	4	12,70	3,20	15,90
VI	6	18,26	4,00	22,26
VII	4	25,40	4,00	29,40
VIII	4	35,71	4,80	40,51

3.1.2 Equipamentos de Radiografia Computadorizada

Para realização deste trabalho foram utilizados cinco equipamentos de radiografia computadorizada (*scanners*), de três diferentes fabricantes. Todos compostos por uma unidade de leitura do IP, uma estação de trabalho e os programas necessários para aquisição e tratamento das imagens. A Tabela 3.2 apresenta as características de cada equipamento utilizado.

Tabela 3.2 - Características dos equipamentos de RC

Equipamento	Fabricante	Tamanho Focal do Laser (μm)	Ganho da PMT	Range Dinâmico	Resolução de Leitura do Scanner
RC1	A	87	0 a 255 (120 – Standard)	12 bits	73 a 512 pixel/pol.
RC2		50	0 a 100	12 bits	25/50/100 μm
RC3	B	50	300 a 1200	16 bits	50/75/100/130/150/200 μm
RC4		30	50 a 1600	16 bits	50/100 μm
RC5	C	12,5	Varia com a resolução de leitura	16 bits	16/25/40/50/100 μm

3.1.3 Detectores

3.1.3.1 Filme Convencional

Para realização da radiografia convencional, foi utilizado o Filme Classe II modelo AA400 fabricado pela Kodak Industrex, por possuir características de sensibilidade, velocidade e resistência adequadas à área industrial (ASTM E 1815, 2006).

Os filmes foram processados manualmente e após a aquisição das imagens, as mesmas foram digitalizadas utilizando o Sistema de Digitalização FS50B da GEIT, que está apresentado na Figura 3.2. Este sistema possui opções de range dinâmico de 12 bits logarítmico e 14 ou 16 bits linear. Sua resolução do laser de varredura varia de 50 a 500 μm em passos de 1 μm e seu range de densidade vai de 0,05 a 4,7 H-D. Os filmes foram analisados com o emprego do negatoscópio Gagne, Inc 340 E modelo 1118 fabricado pela UL, e do densitômetro X-Rite 342 da Incorporated.



Figura 3.2 - Sistema de Digitalização FS50B - GEIT

3.1.3.2 Image Plates (IPs)

Na execução do trabalho foram utilizados três diferentes tipos de IPs. A leitura de cada um foi feita com o respectivo *scanner*, de acordo com o fabricante. Na Tabela 3.3 está a descrição dos IPs utilizados, que são diferenciados por sua resolução. As denominadas placas Azuis possuem melhor resolução que as placas HR.

Tabela 3.3 - Descrição dos *Image Plates*

<i>Image Plate</i>	Fabricante	Resolução
IPA	A	Placas HR
IPB	B	Placas Azuis
IPC	C	

3.1.4 Fontes de Radiação

Nos ensaios radiográficos foram empregados raios X e gama (γ). Como fontes de raios X, foram utilizados os equipamentos da Yxlon modelo XMB225, e da GEIT modelo Isovolt 450 Titan, com tensões máximas de 225 kV e 450 kV, os quais estão apresentados na Figura 3.3 (a) e (b), respectivamente. Como fontes de raios γ , foram empregados o ^{75}Se e o ^{192}Ir , os quais foram utilizados em irradiadores modelo 880 Sigma de fabricação da Sentinel, ilustrado na Figura 3.4.

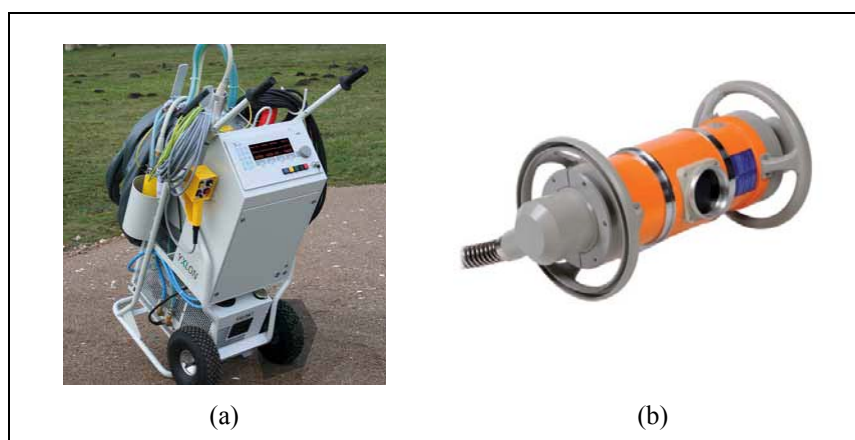


Figura 3.3 - Equipamentos de raios X da (a) Yxlon - XMB225 e (b) GEIT - Isovolt 450 Titan



Figura 3.4 - Foto do irradiador modelo 880 Sigma - Sentinel

3.2 Procedimento Experimental

Este trabalho foi realizado em três etapas. Primeiramente, foi feita a caracterização dos IPs. Posteriormente, foram realizados os ensaios radiográficos utilizando os corpos de prova e sistemas de radiografia descritos anteriormente e, por fim, foi feita a avaliação da qualidade das imagens radiográficas obtidas.

3.2.1 Caracterização dos IPs

A caracterização dos IPs foi realizada com o objetivo de avaliar o comportamento dos parâmetros de qualidade da imagem em função das propriedades de cada placa. Tal caracterização foi feita através da medida da espessura da camada sensível, utilizando-se um micrômetro e da avaliação do tamanho de grão e da composição elementar da mesma, utilizando para isso o microscópio eletrônico de varredura (MEV) Hitachi 3000 do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (IFRJ) com um sistema EDS Quantax 70 acoplado.

O MEV é um tipo de microscópio eletrônico capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. Devido a maneira como são criadas, essas imagens têm uma aparência tridimensional e são úteis para avaliar a estrutura superficial de uma dada amostra. Além disso, a partir do sistema EDS acoplado é possível identificar os elementos químicos presentes na amostra.

3.2.2 Ensaios Radiográficos

Na realização dos ensaios radiográficos foram empregadas as técnicas de radiografia convencional e computadorizada. Em ambos os casos, o método de exposição foi o de Parede Simples Vista Simples (PSVS). Cada corpo de prova foi posicionado sobre o detector (filme convencional ou IP) e ambos colocados a uma distância de 600 mm da fonte de radiação (raios X ou γ). Os filmes e IPs foram radiografados dentro de chassis com écran posterior de chumbo com 0,010 polegadas. Nos filmes foram utilizados ainda écran anterior de chumbo com 0,005 polegadas. Para

posterior análise dos resultados, foram utilizados Indicadores de Qualidade da Imagem (IQIs) sobre as chapas de aço. A Figura 3.5 mostra o esquema experimental utilizado.

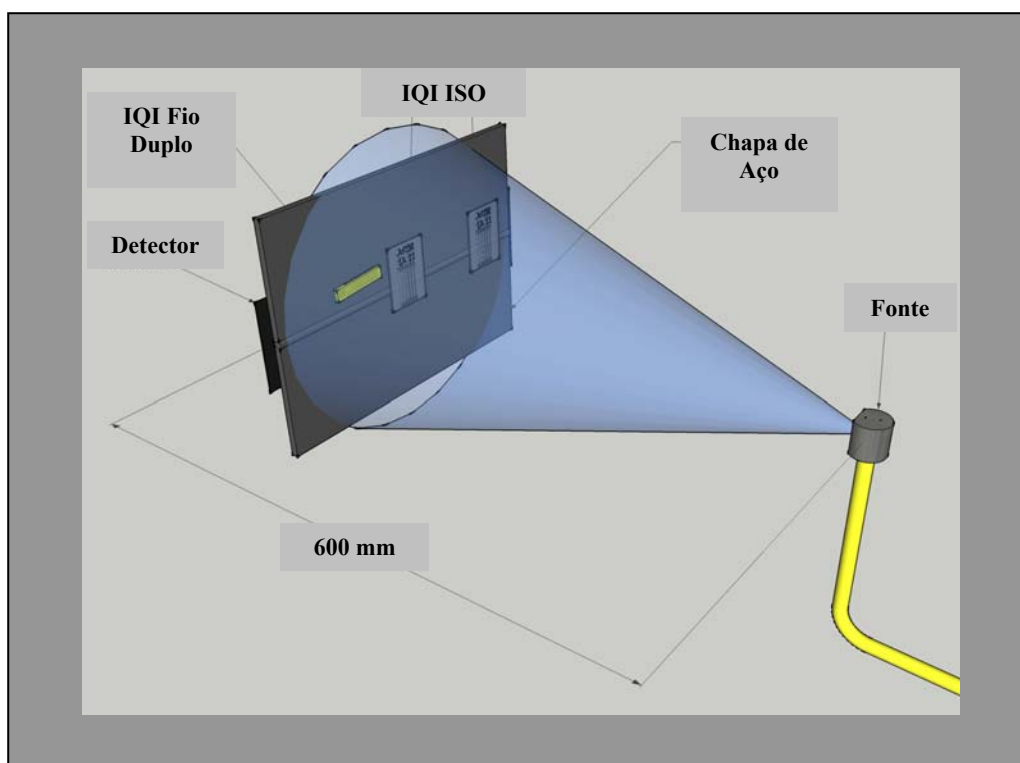


Figura 3.5 - Esquema experimental

A Tabela 3.4 apresenta os parâmetros de exposição utilizados para as fontes de raios X e γ , os quais foram selecionados de acordo com as características de cada CP exposto (EN 14784-2, 2005).

Para cada grupo de CP, radiografado com uma dada fonte de radiação, o único parâmetro variado entre as técnicas convencional e computadorizada foi o tempo de exposição. Como para radiação γ houve variação nos valores da atividade da fonte, foram fornecidos os valores da exposição, que estão apresentados no item 4 (Resultados), já que a comparação entre os mesmos é um fator bastante relevante para o estudo proposto.

Tabela 3.4 - Parâmetros de exposição

Grupo	Raios X				Raios γ		
	Equipamento	Tamanho Focal (mm)	Tensão (kV)	Corrente (mA)	Isótopo	Tamanho Focal (mm)	
						Qualificação	Validação
I	Yxlon	1,0	140	4,0	$^{75}\text{Se}^{**}$	4,2	3,5
II			150	4,0			
III			150	4,0			
IV			160	4,0			
V			190	3,3			
VI			225	2,8			
VII	GE	2,5	270	3,0	^{192}Ir	3,6	
VIII			320*	2,8*			

*Exceto para o equipamento RC3 (tensão 430 kV, Corrente 2,0 mA e filtro de Cu na saída do tubo de raios X)

**Durante as medidas, a fonte de ^{75}Se precisou ser substituída

A primeira técnica realizada para aquisição das imagens radiográficas foi a radiografia convencional. Os filmes foram revelados de acordo com as instruções dos fabricantes, observando que a densidade óptica, medida na área de interesse e na região do IQI, deve ser no mínimo 2,0 e no máximo 4,0 H-D para raios γ e no mínimo 1,8 e no máximo 4,0 H-D para raios X (PR-007, 2004). Os filmes foram digitalizados utilizando Sistema de Digitalização FS50 da GEIT, já mencionado, com tamanho de pixel de 50 μm , range dinâmico de 16 bits e modo de aquisição *high quality*.

Em seguida, foi realizada a RC com os equipamentos descritos anteriormente, todos instalados num mesmo ambiente. Antes do início das medidas foi feito um estudo, que consistiu na definição das características de funcionamento de cada equipamento, dos parâmetros de operação e dos programas de aquisição de dados, armazenamento e processamento das imagens, de modo a torná-los funcionáveis e otimizados. Os valores dos parâmetros selecionados, utilizando raios X e γ estão apresentados nas Tabelas 3.5 e 3.6, respectivamente.

Tabela 3.5 - Parâmetros de leitura dos equipamentos de RC utilizando raios X

Sistema	Equipamento <i>Scanner</i>	Tipo de IP	Fabricante	Potência do Laser	Ganho PMT	Foco Laser (μm)	Tamanho Pixel (μm)
S1	RC1	IPA	A	Standard	120	87	70
S2	RC2			Baixo	50	50	50
S3	RC3	IPB	B	Fixa	550	50	50
S4	RC4			Fixa	200	30	50
S5	RC5	IPC	C	Fixa	650	50	50

Tabela 3.6 - Parâmetros de leitura dos equipamentos de RC utilizando raios γ

Sistema	Equipamento <i>Scanner</i>	Tipo de IP	Fabricante	Potência do Laser	Ganho PMT (V)	Foco Laser (μm)	Tamanho Pixel (μm)
S1	RC1	IPA	A	Standard	120	87	70
S2	RC2			Alto	50	50	50
S3	RC3	IPB	B	Fixa	450	50	50
S4	RC4			Fixa	50*	30	50
S5	RC5	IPC	C	Fixa	650	50	50

*Exceto para os CPs 1826C (ganho 100) e 3571C (ganho 200)

Nesta etapa foram realizados os processos de qualificação e validação em condições de campo dos procedimentos para utilização da RC em inspeções de solda, conforme especificado na norma **PETROBRAS N2821-B (2007)**.

No processo de qualificação, após a análise de todas as imagens obtidas com radiografia convencional, foi escolhido um CP por grupo (Tabela 3.1) para realização da RC com cada sistema, para ambas as fontes de radiação. Uma vez que a imagem para cada conjunto (CP+sistema+fonte) foi aprovada, foram radiografados todos os CPs com espessuras dentro do valor especificado por grupo, para a validação do procedimento. Devido à inviabilidade de realizar as radiografias em ambiente externo, foi montado um arranjo experimental de modo a simular uma situação de campo.

3.2.3 Avaliação da Qualidade da Imagem

As imagens foram consideradas aprovadas quando apresentaram valores dentro dos especificados por norma para os parâmetros de qualidade de imagem - Resolução Espacial Básica (BSR), Razão Sinal Ruído Normalizada (SNR_N) e contraste - e detectabilidade dos defeitos equivalente à técnica convencional.

Para a determinação da BSR, foi feita a radiografia do IQI de fio duplo, mostrado na Figura 3.6. Com base no perfil de linha do IQI, faz-se uma leitura dos valores dos máximos e mínimos de intensidade correspondente a cada par de fios e determina-se o 1º fio duplo não resolvido, que corresponde ao primeiro par de fios que possui a região em que os mesmos são distinguíveis com intensidade menor que 20% de todo o perfil do par de fios em questão (AGFA, 1989) (EN 14784-1, 2005). A Figura 3.7 mostra como esse procedimento é realizado.



Figura 3.6 - IQI de fio duplo

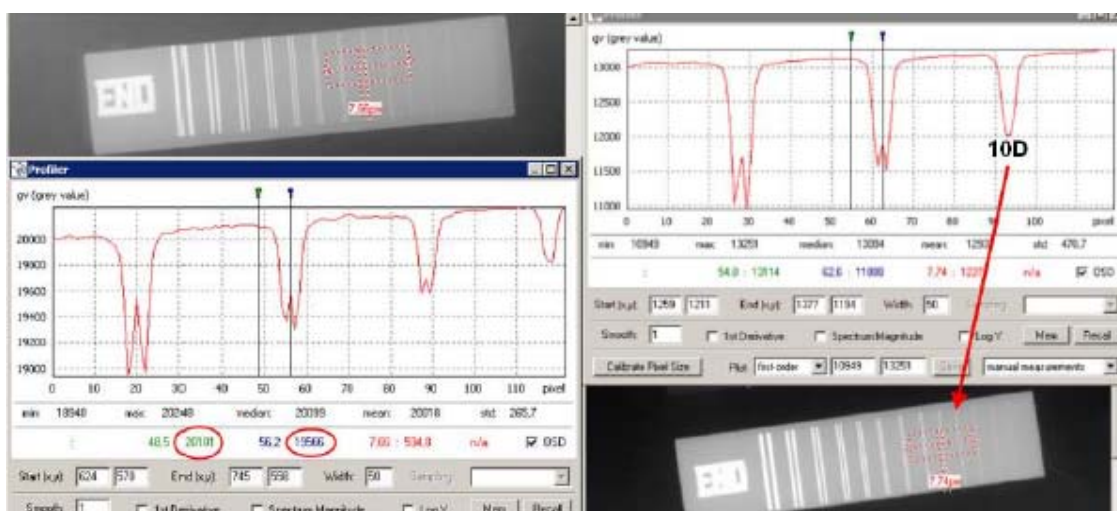


Figura 3.7 - Determinação do primeiro fio duplo não resolvido (MACHADO, 2011)

Uma vez determinado o 1º fio duplo não resolvido, basta verificar a desfocagem geométrica associada a esse e obter o valor da BSR, que é dado pela equação (3.1). Na Tabela 3.7 estão especificados os valores desses parâmetros para cada par de fio.

$$BSR = \frac{\text{Desfocagem Geométrica}}{2} \quad (3.1)$$

Tabela 3.7 - Parâmetros do IQI de fio duplo (EN 462-5, 2004)

Elemento	Desfocagem Geométrica (mm)	BSR (µm)
13D	0,10	50
12D	0,13	65
11D	0,16	80
10D	0,20	100
9D	0,26	130
8D	0,32	160
7D	0,40	200
6D	0,50	250
5D	0,64	320
4D	0,80	400
3D	1,00	500
2D	1,26	630
1D	1,60	800

A SNR_N é obtida a partir da BSR, através da equação (3.2) (ASTM E 2445-05, 2005) (ASTM E 2446-05, 2005).

$$SNR_N = \frac{SNR_{média} \cdot 88,6}{BSR} \quad (3.2)$$

Os valores de SNR_N foram obtidos utilizando o programa *Isee* (BAM, 2007), através da seleção de regiões de interesse, de tamanho 20 x 55 pontos, em diversas áreas

da imagem na região adjacente ao cordão de solda, como pode ser verificado na Figura 3.8.

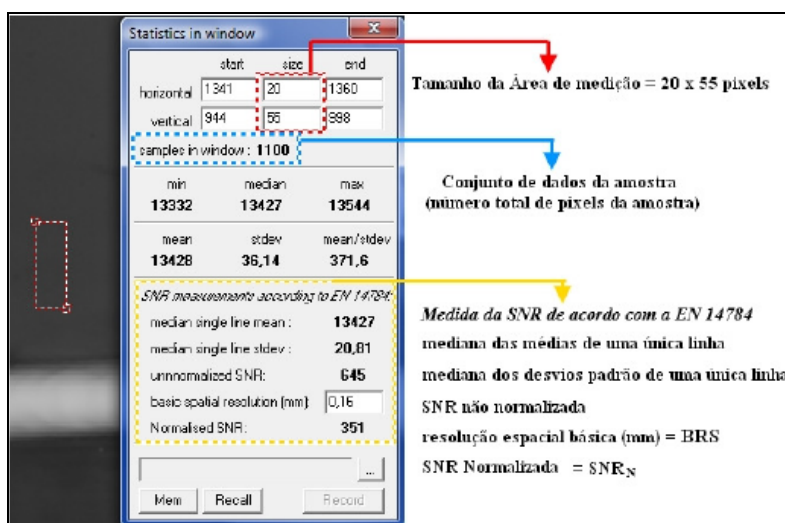


Figura 3.8 - Determinação da SNR_N (NASCIMENTO, 2012)

O contraste foi avaliado, radiografando-se dois IQIs de fios ISO (KODAK, 1980) (ISO 19232-1, 2004) posicionado sobre o cordão de solda, como mostra a Figura 3.9, um na região central e outro na extremidade da solda. O valor do contraste atingido por cada imagem está associado ao número do fio mais fino visível na radiografia.

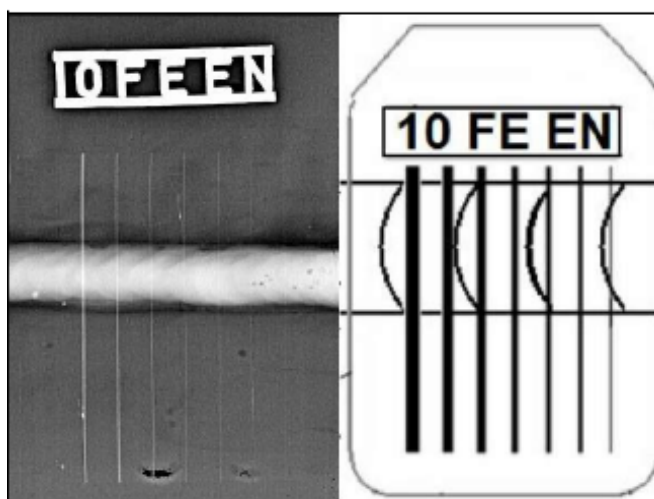


Figura 3.9 – Posicionamento do IQI de fios ISO

Uma vez determinado os parâmetros de qualidade da imagem, foi verificado se os mesmos alcançaram os valores estabelecidos por norma específica. As exigências de

qualidade radiográfica para aprovação dependem da faixa de espessura de material. Os valores requeridos para cada grupo analisado estão apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Valores exigidos dos parâmetros de qualidade da imagem radiográfica

Grupo	Contraste	BSR (μm)	SNR_N
I	12	100 (raios X) 160 (raios γ)	100
II	12		
III	11		
IV	10		
V	10		
VI	9		
VII	8		
VIII	7		

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos neste trabalho, segundo a metodologia apresentada no capítulo anterior.

4.1 Caracterização dos Image Plates

Neste trabalho foram analisados três diferentes tipos de IPs para estudar de que maneira os mesmos interferem na qualidade da imagem digital, caracterizando assim cada placa e permitindo correlacioná-las com sua resposta na imagem final. Como resultados foram obtidos a composição elementar da camada sensível de cada IP, apresentada na Tabela 4.1, além do tamanho médio dos grãos e da espessura desta camada, apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Composição elementar da camada sensível de cada IP

<i>Image Plate</i>	Elemento (%)				
	Flúor	Bromo	Iodo	Bário	Estrôncio
IPA	11,51	26,55	13,27	48,67	-
IPB	14,08	36,62	12,68	32,39	4,23
IPC	19,20	38,39	10,10	32,31	-

Quanto à composição elementar, observamos que há presença de Flúor, Bromo, Iodo e Bário em todas as placas analisadas, elementos estes que já estavam previstos pela teoria. A placa IPB, diferente das demais, possui ainda o elemento Estrôncio. Podemos notar ainda que as placas com melhor resolução (Placas Azuis) possuem menores concentrações de Iodo e Bário e maiores de Flúor e Bromo.

Tabela 4.2 - Tamanho médio dos grãos e espessura da camada sensível de cada IP

<i>Image Plate</i>	Espessura da Camada Sensível (μm)	Tamanho do Grão (μm)
IPA	285 ± 50	$5,37 \pm 1,83$
IPB	120 ± 50	$3,94 \pm 0,91$
IPC	130 ± 50	$2,43 \pm 0,69$

Com relação ao tamanho médio dos grãos e da espessura da camada sensível, observamos que as placas com maior resolução requerem menores valores para essas dimensões, o que também já era previsto pela teoria. Além disso, como o tamanho do grão de cada placa foi definido a partir de uma média, existe uma incerteza associada a esse valor. Essa incerteza é representada pelo desvio padrão da média dos tamanhos dos grãos medidos. As Figuras 4.1 a 4.3 mostram imagens da camada sensível de cada IP obtidas através do MEV com ampliação de 1000x.

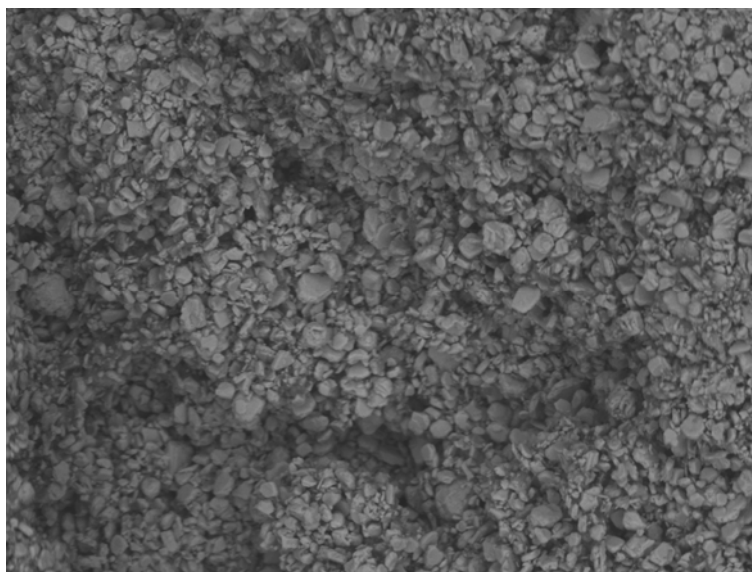


Figura 4.1 - Imagem da camada sensível do IPA obtidas através do MEV com ampliação de 1000x

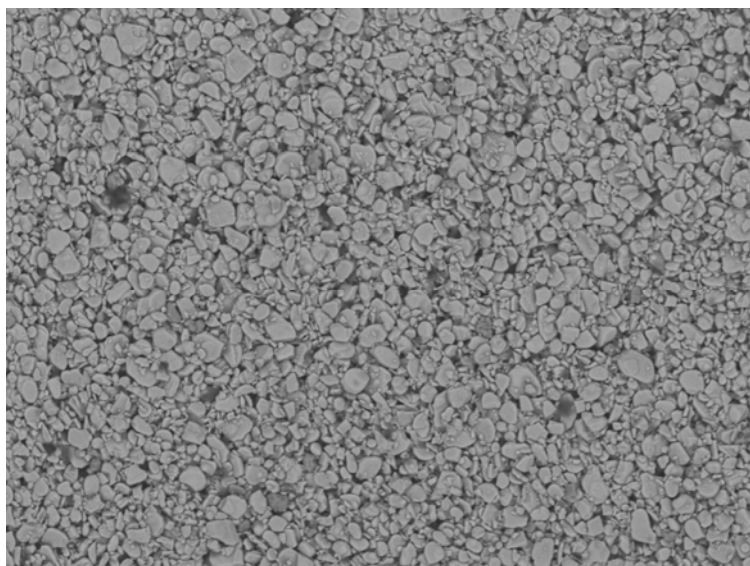


Figura 4.2 - Imagem da camada sensível do IPB obtidas através do MEV com ampliação de 1000x

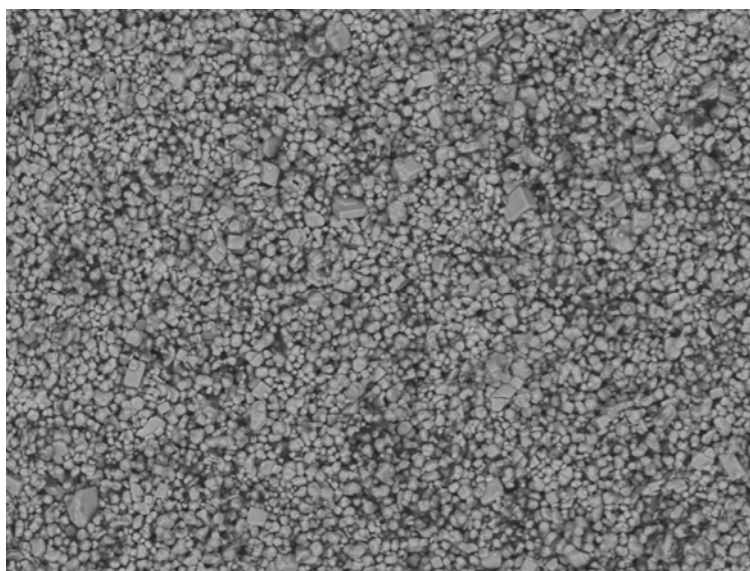


Figura 4.3 - Imagem da camada sensível do IPC obtidas através do MEV com ampliação de 1000x

4.2 Radiografia Convencional

A radiografia convencional foi realizada para todos os 31 CPs analisados. Os valores de contraste e densidade óptica (DO) foram obtidos diretamente do filme e, junto com os valores de exposição, estão apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4 para fontes de raios X e γ , respectivamente. Todas as radiografias foram realizadas de modo a obter imagens que apresentasse DO e contraste dentro dos valores exigidos.

Tabela 4.3 – Valores de exposição, densidade óptica e contraste obtidos com a radiografia convencional utilizando fonte de raios X

Grupo	Identificação CP	Exposição (mA.s)	DO	Contraste ISO	
				Centro	Lado
I	533A	440	2,45	13	14
	533B		2,23	14	15
	533C		2,32	14	14
II	635A	440	2,81	13	14
	635B		2,84	13	13
	635C		2,46	13	13
III	711A	480	2,51	14	13
	711B		2,53	14	13
	711C		2,52	14	13
IV	953A	600	2,53	12	12
	953B		2,64	12	12
	953C		2,36	12	12
	953D		2,54	12	12
V	1270A	495	2,72	12	12
	1270B		2,79	12	12
	1270C		2,94	12	12
	1270D		2,83	12	12
VI	1826A	336	2,54	12	12
	1826B		2,56	12	12
	1826C		2,39	11	12
	1826D		2,61	12	12
	1826F		2,58	12	12
	1826G		2,52	12	12
VII	2540A	270	2,52	11	12
	2540B		2,54	12	11
	2540C		2,69	11	12
	2540D		2,74	12	12
VIII	3571A	280	2,57	10	9
	3571B		2,57	11	11
	3571C		2,78	11	11
	3571D		2,61	11	11

Tabela 4.4 - Valores de exposição, densidade óptica e contraste obtidos com a radiografia convencional utilizando fonte de raios γ

Grupo	Identificação CP	Atividade (Ci)	Exposição ($\times 10^3$ Ci.s)	DO	Contraste ISO	
					Centro	Lado
I	533A	16,11	8,70	2,86	13	13
	533B	16,11		2,91	13	13
	533C	16,11		2,80	13	13
II	635A	16,02	9,37	2,96	13	12
	635B	16,02		3,01	12	12
	635C	16,02		2,83	13	13
III	711A	16,02	10,57	3,06	12	12
	711B	16,02		3,13	12	13
	711C	16,02		3,16	13	13
IV	953A	15,93	12,7	3,15	12	12
	953B	15,93		3,13	12	12
	953C	16,02		3,04	12	12
	953D	15,93		3,15	12	12
V	1270A	15,83	15,1	2,75	12	12
	1270B	15,83		2,87	12	12
	1270C	15,93		2,91	12	12
	1270D	15,83		3,00	12	12
VI	1826A	47,70	10,3	2,68	11	12
	1826B	47,70		3,08	11	11
	1826C	47,70		2,83	12	12
	1826D	47,70		2,91	12	12
	1826F	47,70		2,92	11	11
	1826G	47,70		2,93	12	12
VII	2540A	48,61	14,6	3,04	12	11
	2540B	48,61		2,95	11	12
	2540C	48,61		3,10	12	12
	2540D	48,61		2,97	12	11
VIII	3571A	49,07	20,1	3,03	11	11
	3571B	49,07		2,94	11	11
	3571C	49,07		2,98	11	10
	3571D	49,07		2,90	11	11

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram algumas das imagens radiográficas convencionais que foram digitalizadas para ilustração. Nestas imagens foi aplicado um filtro matemático para realçar os detalhes como o fio ISO, que está destacado na imagem com uma seta amarela.

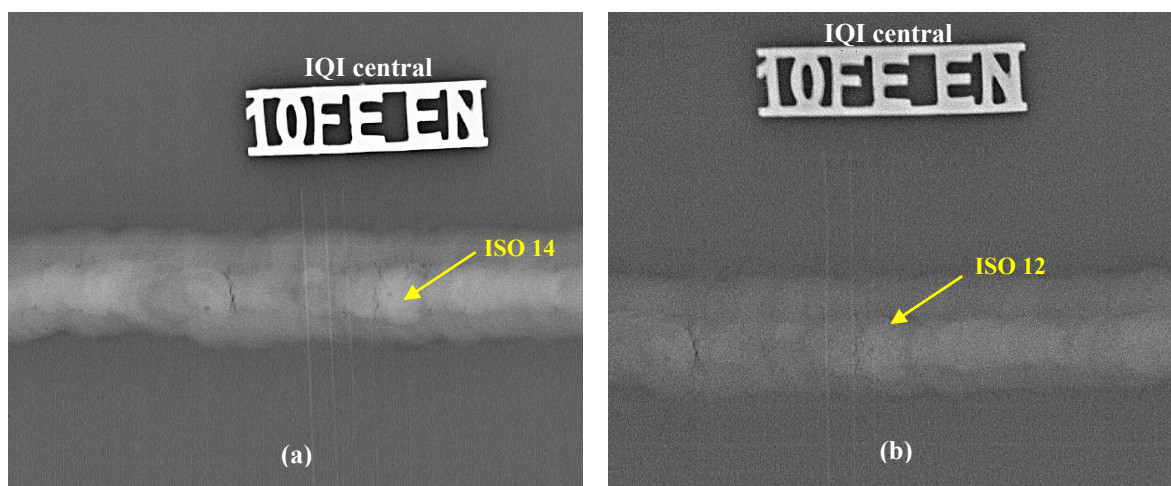


Figura 4.4 - Imagens radiográficas convencionais do CP 711A, utilizando (a) raios X e (b) ^{75}Se

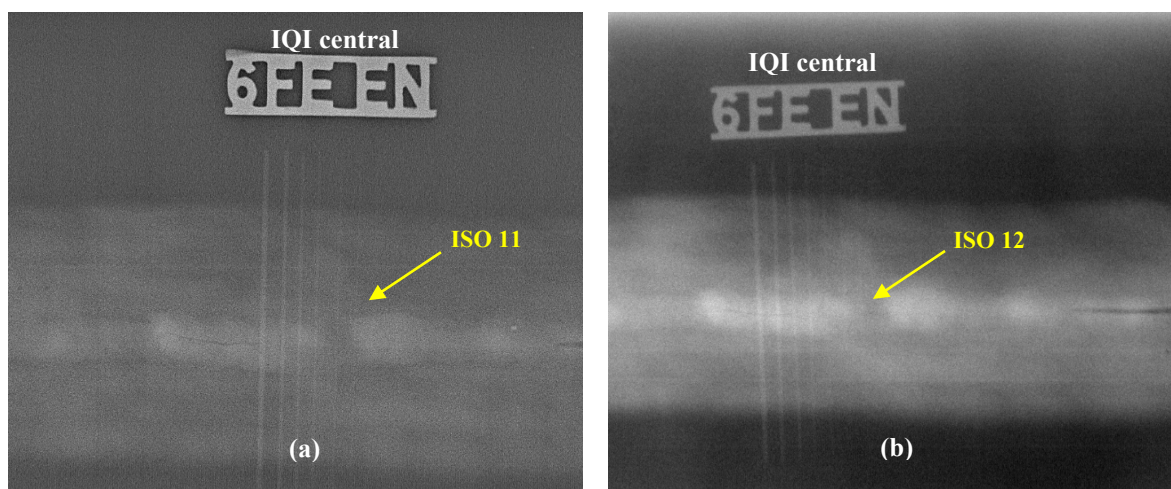


Figura 4.5 - Imagens radiográficas convencionais do CP 2540A, utilizando (a) raios X e (b) ^{192}Ir

4.3 Radiografia Computadorizada

Neste item serão apresentados os resultados alcançados pelas imagens obtidas a partir da radiografia computadorizada, para as etapas de qualificação e validação do procedimento. Só foram reproduzidas nesta segunda etapa as imagens aprovadas na primeira. Os parâmetros considerados reprovados estão apresentados em vermelho e as linhas correspondentes aos CPs reprovados estão sombreadas.

4.3.1 - Qualificação do Procedimento

As Tabelas 4.5 a 4.14 mostram os valores obtidos na etapa de qualificação do procedimento para a exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, utilizando raios X e γ .

Tabela 4.5 – Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S1, com fonte de raios X

Grupo	Identificação CP	Exposição (mA.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR_N	Detectabilidade
			Centro	Lado			
I	533A	40	13	13	100	169	Sim
II	635B	44	12	13	100	189	Sim
III	711A	56	14	13	100	185	Sim
IV	953C	76	12	12	100	183	Sim
V	1270C	63	12	12	100	179	Sim
VI	1826C	76	11	11	100	167	Sim
VII	2540A	96	10	10	100	158	Sim
VIII	3571C	151	10	9	100	159	Sim

Tabela 4.6 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S2, com fonte de raios X

Grupo	Identificação CP	Exposição (mA.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR_N	Detectabilidade
			Centro	Lado			
I	533A	480	13	13	80	192	Sim
II	635B	560	13	14	80	195	Sim
III	711A	640	13	13	80	191	Sim
IV	953C	900	12	12	80	194	Sim
V	1270C	858	12	12	80	191	Sim
VI	1826C	728	11	11	80	180	Sim
VII	2540A	2340	9	10	100	178	Sim
VIII	3571C	2772	10	9	100	178	Sim

Tabela 4.7 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S3, com fonte de raios X

Grupo	Identificação CP	Exposição (mA.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR _N	Detectabilidade
			Centro	Lado			
I	533A	120	14	13	50	187	Sim
II	635B	120	13	13	50	190	Sim
III	711A	140	13	13	50	174	Sim
IV	953C	208	12	12	50	179	Sim
V	1270C	172	12	12	50	192	Sim
VI	1826C	232	11	11	50	184	Sim
VII	2540A	300	9	9	80	115	Sim
VIII	3571C	170	8	9	100	80	Sim

Tabela 4.8 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S4, com fonte de raios X

Grupo	Identificação CP	Exposição (mA.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR _N	Detectabilidade
			Centro	Lado			
I	533A	152	13	13	50	221	Sim
II	635B	140	14	14	50	219	Sim
III	711A	180	13	13	50	219	Sim
IV	953C	260	12	12	50	218	Sim
V	1270C	231	12	12	50	211	Sim
VI	1826C	308	11	11	65	168	Sim
VII	2540A	330	10	10	80	135	Sim
VIII	3571C	515	9	9	80	131	Sim

Tabela 4.9 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S5, com fonte de raios X

Grupo	Identificação CP	Exposição (mA.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR _N	Detectabilidade
			Centro	Lado			
I	533A	120	13	13	50	243	Sim
II	635B	120	13	14	50	237	Sim
III	711A	144	13	13	50	230	Sim
IV	953C	192	12	12	50	227	Sim
V	1270C	165	12	12	50	217	Sim
VI	1826C	216	11	12	50	217	Sim
VII	2540A	270	11	11	65	175	Sim
VIII	3571C	392	9	9	80	139	Sim

Tabela 4.10 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S1, com fonte de raios γ

Grupo	Identificação CP	Atividade (Ci)	Exposição (x10 ³ Ci.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR _N	Detectabilidade
				Centro	Lado			
I	533A	16,1	4,83	13	13	100	150	Sim
II	635B	16,0	7,20	12	12	100	162	Sim
III	711A	16,0	7,68	13	12	100	160	Sim
IV	953C	15,9	9,54	12	12	130	123	Sim
V	1270C	15,9	12,4	11	12	130	118	Sim
VI	1826C	46,4	19,5	9	10	130	141	Sim
VII	2540A	48,2	26,5	9	10	160	117	Sim
VIII	3571C	49,5	39,6	8	8	160	104	Não

Tabela 4.11 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S2, com fonte de raios γ

Grupo	Identificação CP	Atividade (Ci)	Exposição (x10 ³ Ci.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR _N	Detectabilidade
				Centro	Lado			
I	533A	16,1	16,4	13	13	100	195	Sim
II	635B	16,0	17,3	12	12	100	179	Sim
III	711A	16,0	17,8	12	12	100	181	Sim
IV	953C	15,9	19,1	12	12	100	180	Sim
V	1270C	15,9	21,5	12	12	130	135	Sim
VI	1826C	45,9	30,3	10	11	130	150	Sim
VII	2540A	30,7	92,1	9	10	160	127	Sim
VIII	3571C	48,6	61,2	9	8	130	128	Não

Tabela 4.12 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S3, com fonte de raios γ

Grupo	Identificação CP	Atividade (Ci)	Exposição (x10 ³ Ci.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR _N	Detectabilidade
				Centro	Lado			
I	533A	16,0	19,2	12	13	80	120	Sim
II	635B	16,0	24,0	13	12	80	120	Sim
III	711A	16,0	28,8	12	12	80	122	Sim
IV	953C	15,9	35,3	12	12	80	120	Sim
V	1270C	15,9	89,7	11	10	65	155	Sim
VI	1826C	46,4	181	11	10	130	101	Não
VII	2540A	48,2	173	9	10	160	76	Não
VIII	3571C	45,9	344	8	9	160	79	Não

Tabela 4.13 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S4, com fonte de raios γ

Grupo	Identificação CP	Atividade (Ci)	Exposição (x10 ³ Ci.s)	Contraste ISO		BSR (μ m)	SNR _N	Detectabilidade
				Centro	Lado			
I	533A	16,1	19,3	13	13	80	121	Sim
II	635B	16,0	24,0	12	12	80	127	Sim
III	711A	16,0	28,8	12	12	80	130	Sim
IV	953C	15,9	33,4	12	12	80	127	Sim
V	1270C	15,8	43,6	12	11	80	128	Sim
VI	1826C	46,4	114	11	10	130	93	Não
VII	2540A	48,2	145	9	9	130	90	Não
VIII	3571C	48,6	61,2	9	9	160	54	Não

Tabela 4.14 - Valores de exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, obtidos na etapa de qualificação para o sistema S5, com fonte de raios γ

Grupo	Identificação CP	Atividade (Ci)	Exposição (x10 ³ Ci.s)	Contraste ISO		BSR (μ m)	SNR _N	Detectabilidade
				Centro	Lado			
I	533A	16,1	24,2	13	13	80	144	Sim
II	635B	16,0	25,9	13	12	80	137	Sim
III	711A	16,0	27,1	13	12	80	135	Sim
IV	953C	15,9	32,4	12	12	80	133	Sim
V	1270C	15,9	39,8	11	11	100	107	Sim
VI	1826C	46,4	90,0	10	10	130	102	Não
VII	2540A	48,2	116	9	10	130	99	Sim
VIII	3571C	49,1	58,9	9	9	160	55	Não

A condição de aprovação é a de que todos os parâmetros de qualidade da imagem atinjam os valores especificados por norma e que as mesmas tenham detectabilidade equivalente à radiografia convencional. No entanto, apesar das imagens do CP 3751C obtida pelo sistema S3 utilizando raios X e do CP 2540A obtida pelo sistema S5 utilizando raios γ apresentarem valores de SNR_N um pouco abaixo do requerido, foram aprovadas para a fase de validação, por terem apresentado os demais parâmetros dentro do exigido, inclusive a detectabilidade.

As Figuras 4.6 a 4.9 ilustram algumas imagens obtidas nesta etapa, com visualização dos resultados encontrados. O valor destacado em verde representa a SNR_N na região selecionada da imagem, a seta amarela aponta o menor fio ISO visível e o retângulo azul mostra o primeiro fio duplo não discernível para determinação da BSR.

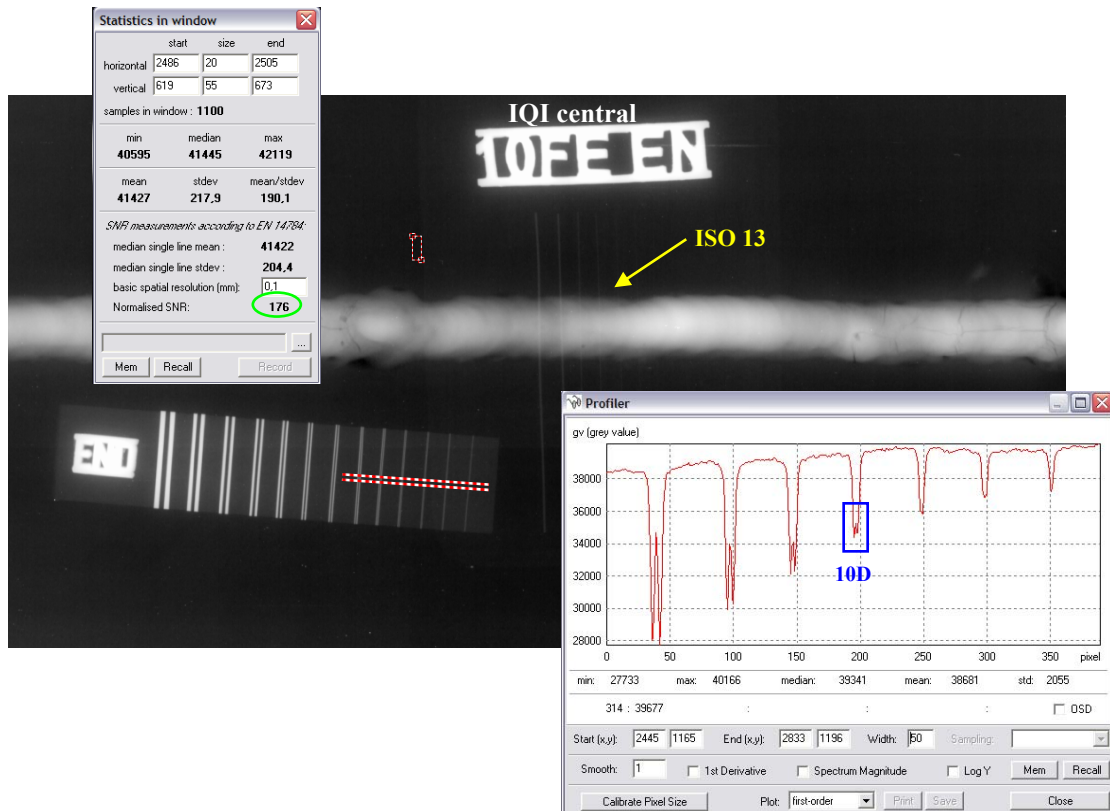


Figura 4.6 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 533A, utilizando o sistema S1 e raios X

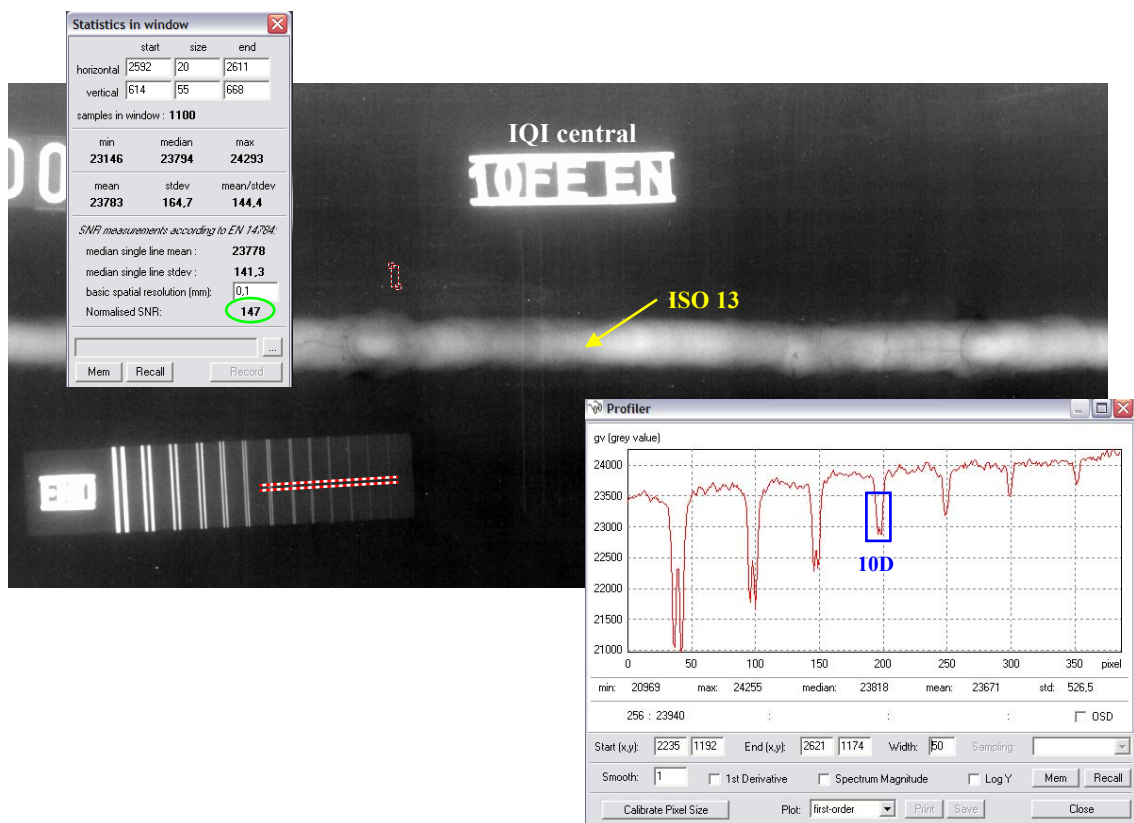


Figura 4.7 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 533A, utilizando o sistema S1 e ^{75}Se

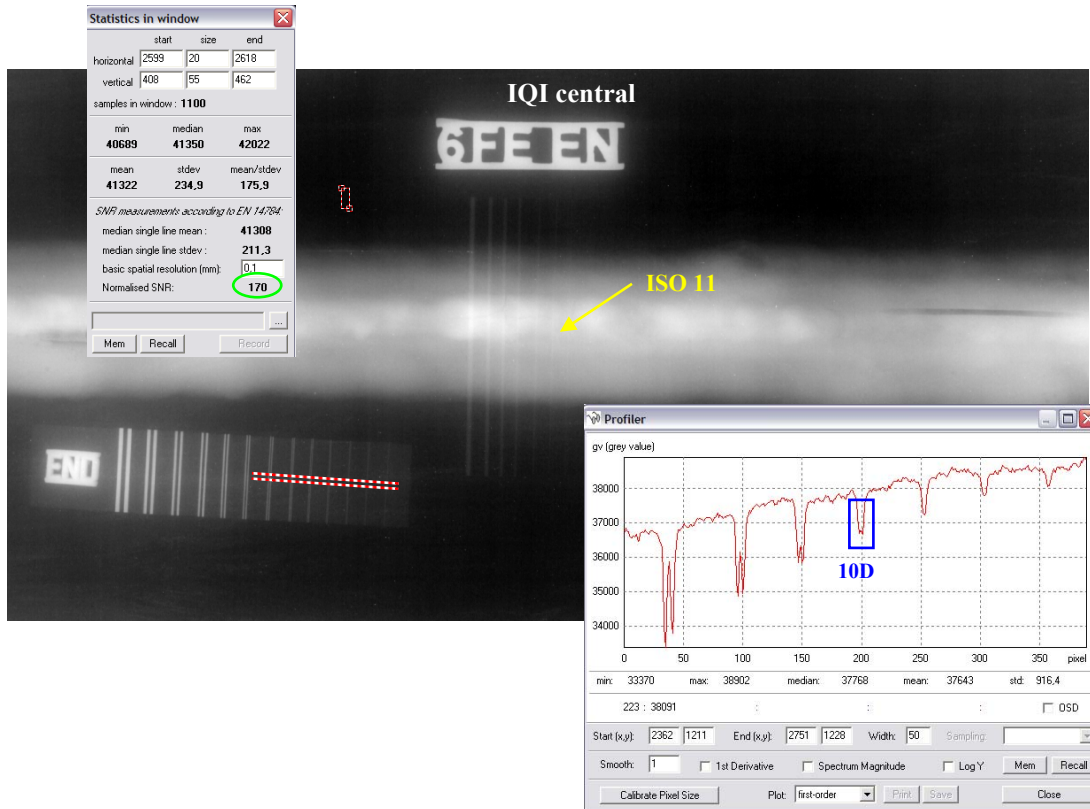


Figura 4.8 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 1826C, utilizando o sistema S1 e raios X

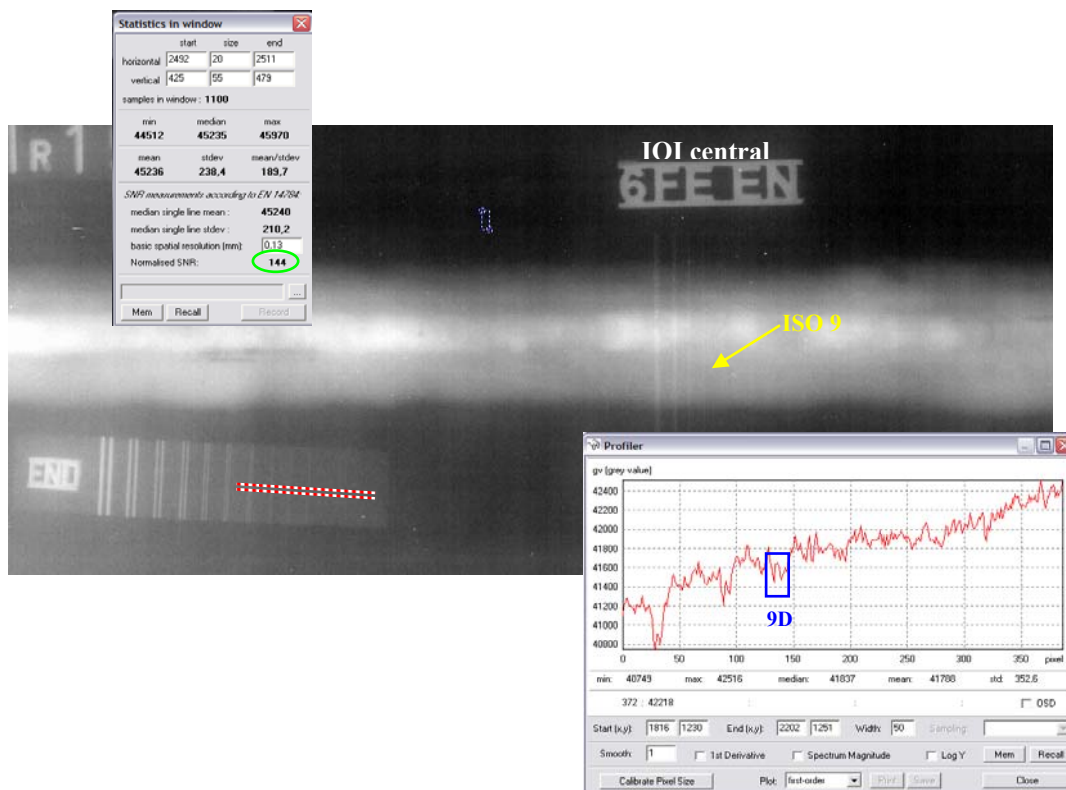


Figura 4.9 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 1826C, utilizando o sistema S1 e ^{192}Ir

A Figura 4.10 mostra as imagens radiográficas do CP 1270C, utilizando raios X, com a radiografia convencional e os cinco sistemas de RC. Todas apresentaram o mesmo fio ISO central visível (destacado com uma seta amarela) e detectabilidade equivalente.

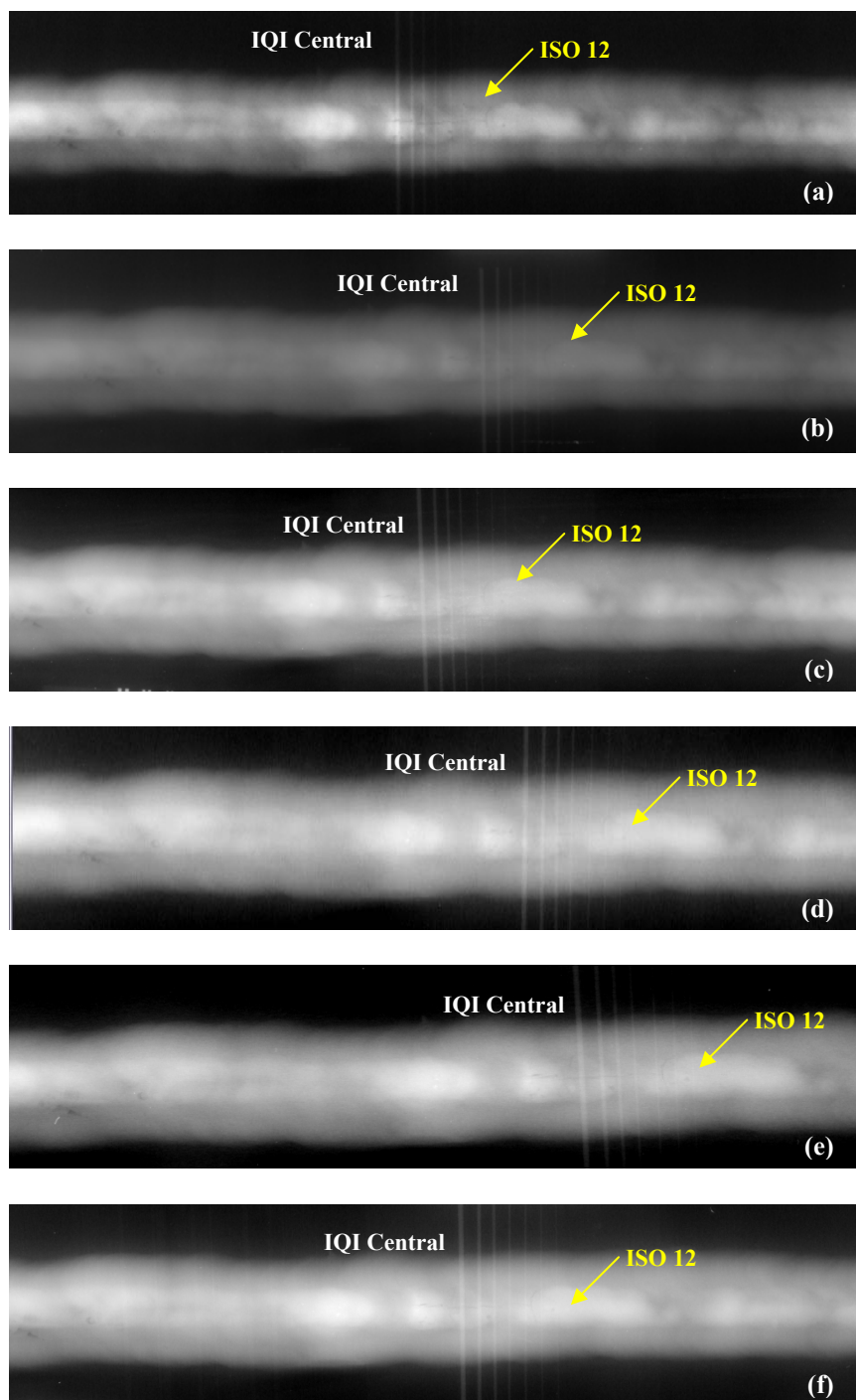


Figura 4.10 - Imagens radiográficas do CP 1270C, utilizando raios X, com (a) radiografia convencional e os sistemas (b) S1, (c) S2, (d) S3, (e) S4 e (f) S5

Uma primeira análise dos resultados obtidos na etapa de qualificação pode ser feita a partir do confronto entre os valores de exposição requeridos pelos sistemas de RC e pela radiografia convencional. As Figuras 4.11 e 4.12 mostram os gráficos para melhor comparação desses valores, para fontes de raios X e γ , respectivamente.

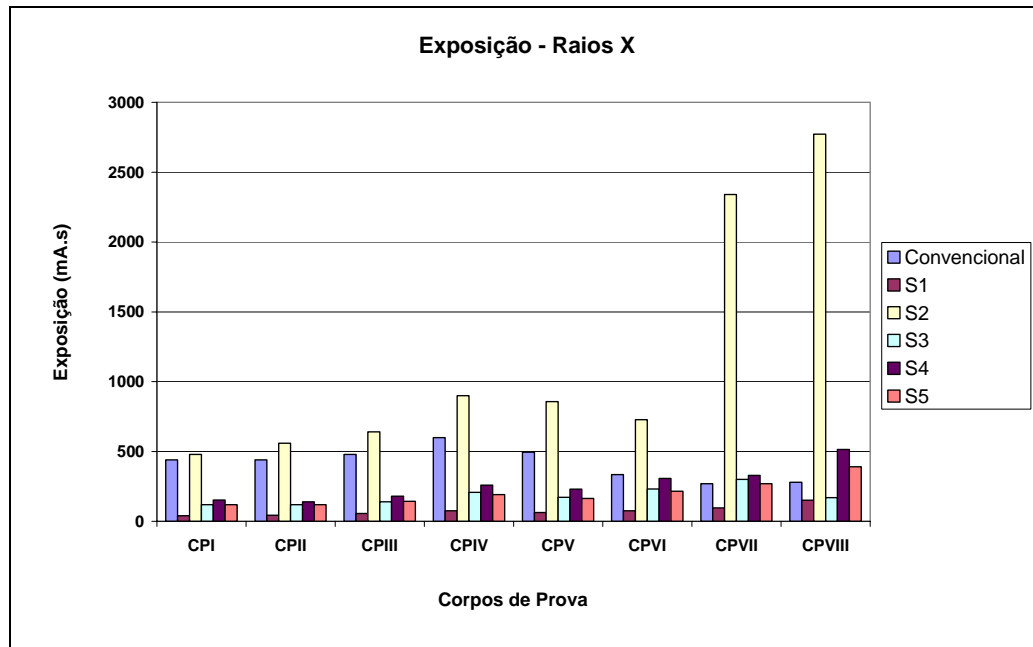


Figura 4.11 - Comparação dos valores de exposição, para fonte de raios X, requeridos pelos sistemas de RC e pela radiografia convencional, na etapa de qualificação

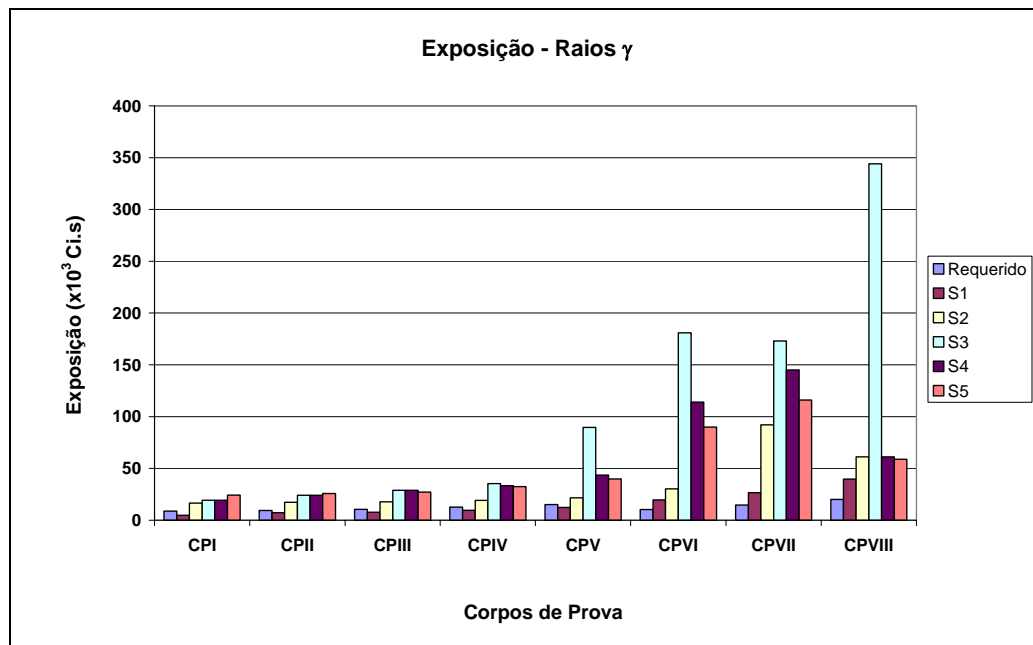


Figura 4.12 - Comparação dos valores de exposição, para fonte de raios γ , requeridos pelos sistemas de RC e pela radiografia convencional, na etapa de qualificação

Utilizando raios X, o valor da exposição foi menor para a RC em 68% dos casos. Somente o sistema S2 apresentou, para todos os CPs, o tempo de exposição maior que o utilizado para as radiografias convencionais. Isso ocorreu devido a sua limitação de trabalhar com potência do laser baixa para imagens com raios X.

Para os raios γ , somente 12% dos valores para a exposição foram menores que os utilizados na técnica convencional, todos estes alcançados pelo sistema S1. Os valores elevados são explicados pelo fato dos IPs utilizados apresentarem baixa eficiência de detecção em função das energias deste tipo de fonte de radiação.

Com os resultados encontrados para os parâmetros de qualidade da imagem, foram também construídos gráficos comparativos entre os valores alcançados por cada sistema e os exigidos por norma, os quais estão apresentados nas Figuras 4.13 a 4.18.

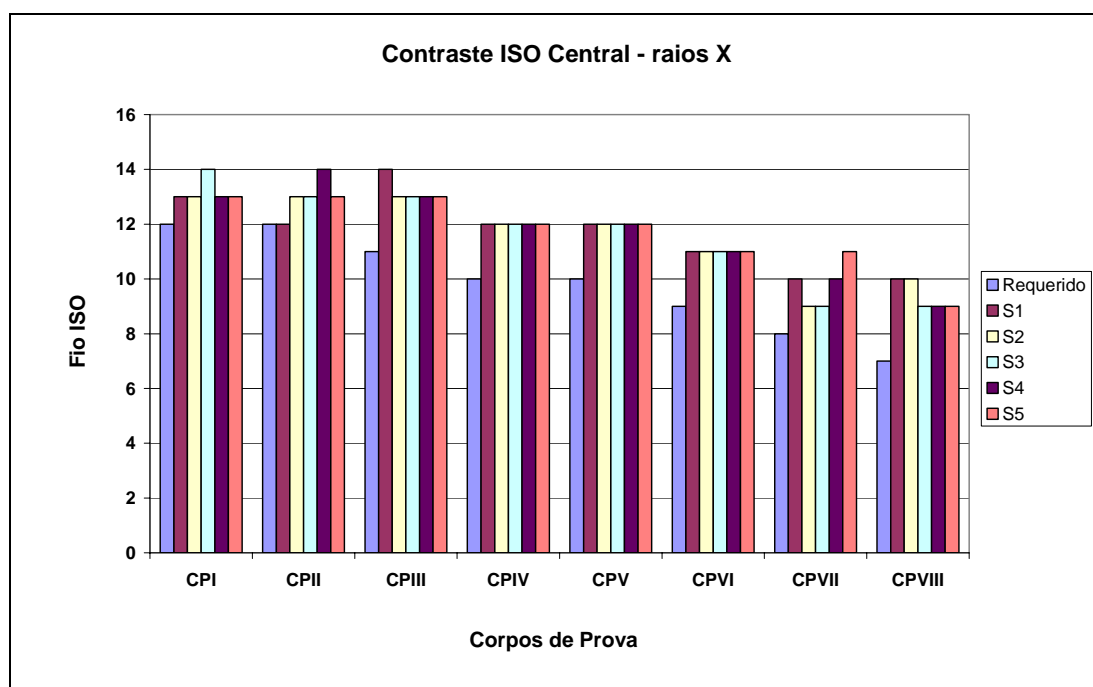


Figura 4.13 - Comparação do contraste IQI ISO central alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios X, na etapa de qualificação

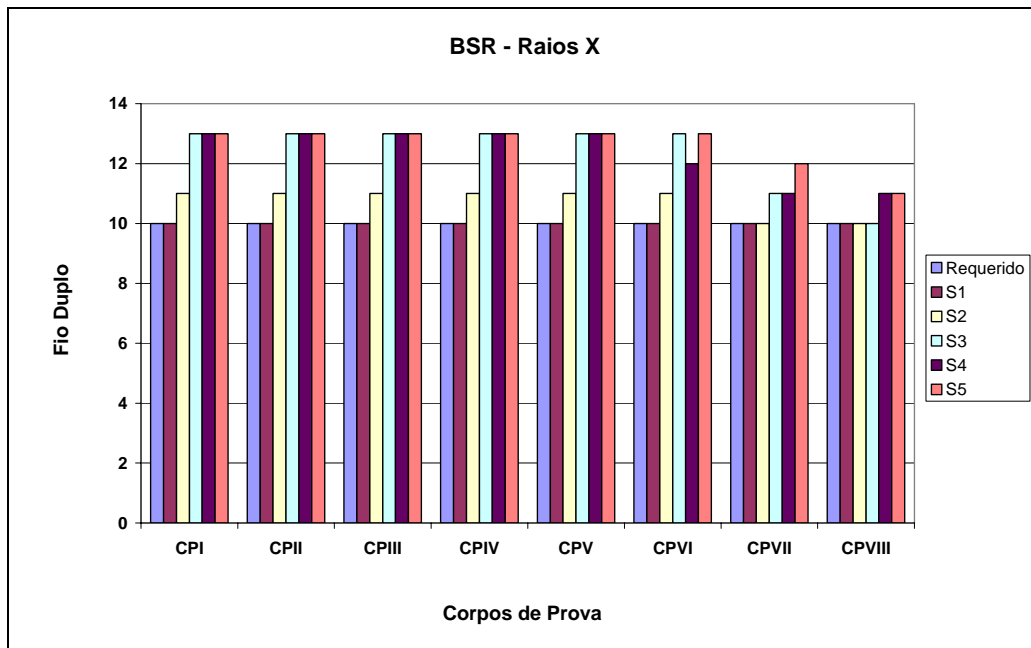


Figura 4.14 - Comparação da BSR alcançada pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios X, na etapa de qualificação

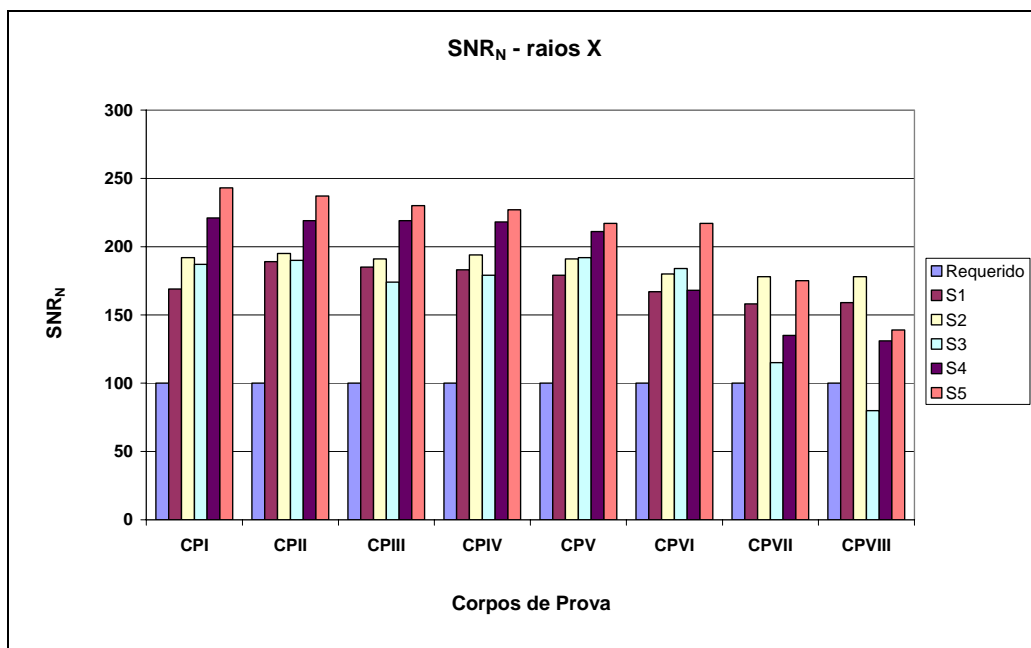


Figura 4.15 - Comparação da SNR_N alcançada pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios X, na etapa de qualificação

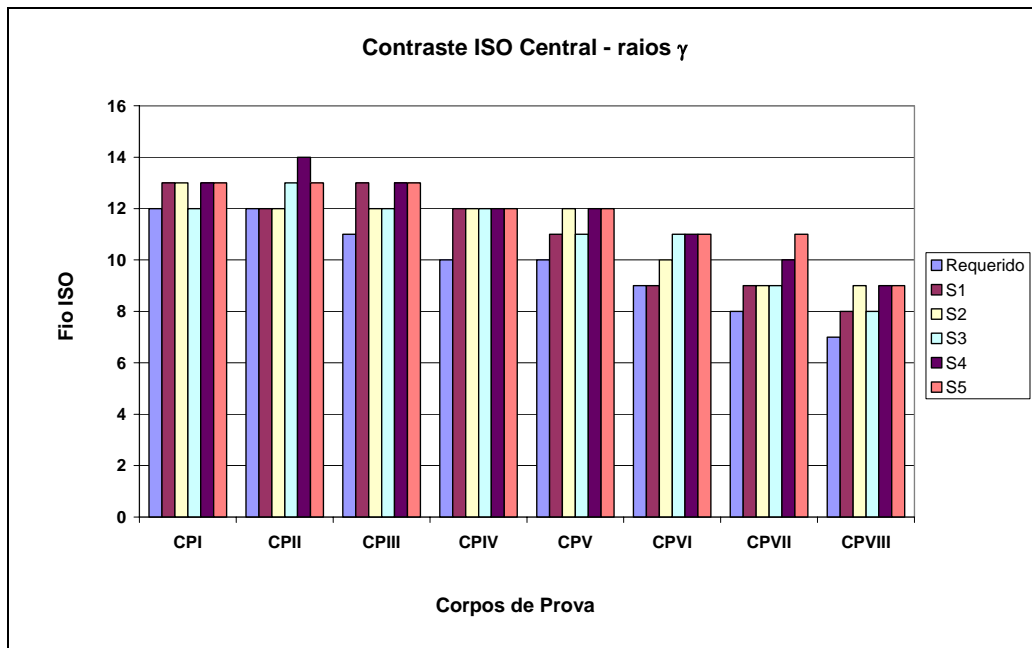


Figura 4.16 - Comparação do contraste IQI ISO central alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios γ , na etapa de qualificação

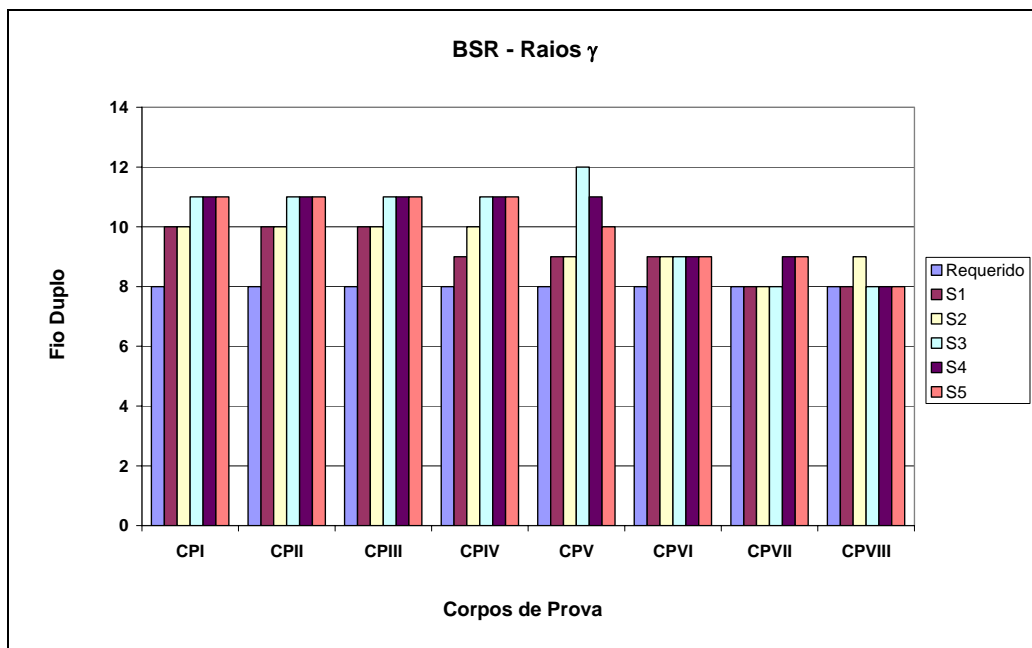


Figura 4.17 - Comparação da BSR alcançada pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios γ , na etapa de qualificação

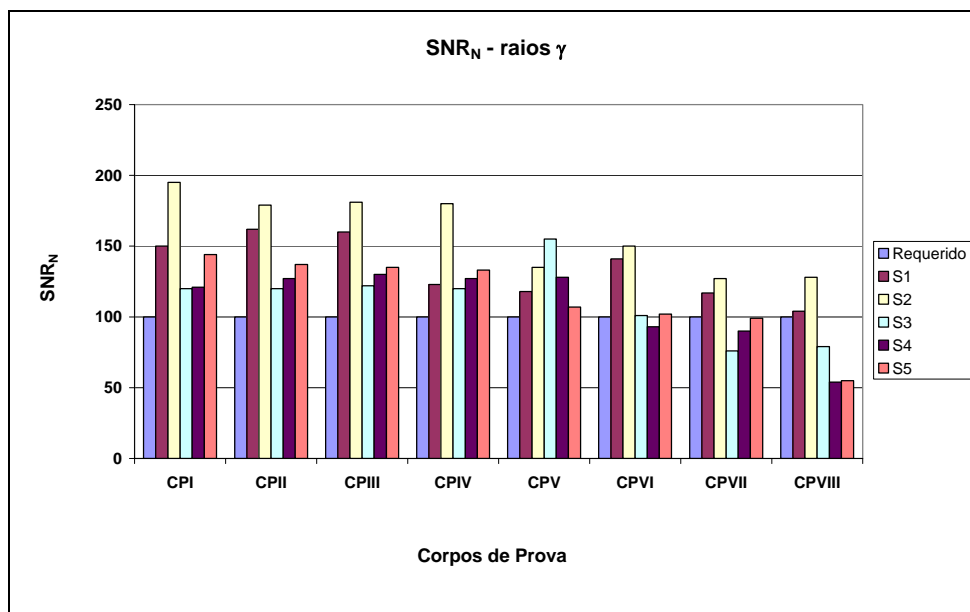


Figura 4.18 - Comparação da SNR_N alcançada pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios γ , na etapa de qualificação

Todas as imagens apresentaram valores de contraste e BSR aprovados, inclusive superando os valores exigidos em 90% e 77% dos casos, respectivamente. Os parâmetros de qualidade encontrados utilizando fonte de raios X foram melhores que para a fonte γ , uma vez que o tempo de exposição foi maior nesta segunda, acarretando em grande quantidade de ruído na imagem radiográfica.

As Tabelas 4.15 e 4.16 mostram o resultado final da avaliação das imagens para todos os sistemas na etapa de qualificação, utilizando fonte de raios X e raios γ , respectivamente.

Tabela 4.15 - Avaliação das imagens para os sistemas de RC, na etapa de qualificação, utilizando raios X

Grupo	Avaliação das Imagens				
	S1	S2	S3	S4	S5
I	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
II	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
III	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
IV	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
V	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
VI	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
VII	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
VIII	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada

Tabela 4.16 - Avaliação das imagens para os sistemas de RC, na etapa de qualificação, utilizando raios γ

Grupo	Avaliação das Imagens				
	S1	S2	S3	S4	S5
I	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
II	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
III	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
IV	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
V	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada	Aprovada
VI	Aprovada	Aprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada
VII	Aprovada	Aprovada	Reprovada	Reprovada	Aprovada
VIII	Reprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada	Reprovada

Na etapa de qualificação, todas as imagens obtidas a partir do uso de raios X e de ^{75}Se foram aprovadas, ou seja, apresentaram valores dentro dos especificados por norma para os parâmetros de qualidade de imagem e detectabilidade equivalente à convencional.

Já as imagens obtidas com ^{192}Ir não foram, em sua maioria, qualificadas. As mesmas não apresentaram valores requeridos para os sistemas S3 e S4 em todas as faixas de espessuras, para o S5 nos grupos VI e VIII e para o S1 e o S2 no grupo VIII. As imagens obtidas com esta fonte tiveram um índice de reprovação de 67%, dentre os quais 40% somente a detectabilidade não foi aprovada, os demais foram reprovados também na SNR_N .

4.3.1.1 Desempenho dos IPs

Os resultados alcançados na etapa de qualificação e na caracterização do IP possibilitaram um estudo do desempenho dos mesmos, correlacionando suas propriedades físicas com a resposta de cada um nas imagens obtidas. Como dito anteriormente, o IPA foi utilizado nos sistemas S1 e S2, o IPB nos S3 e S4 e o IPC no S5. Estas duas últimas são classificadas como placas Azuis e possuem melhor resolução que a primeira classificada como placa HR.

As placas Azuis apresentaram imagem com melhor BSR em 87% dos casos, para ambas as fontes de radiação. Também tiveram melhor desempenho para o contraste utilizando raios γ e, nas espessuras dos grupos I a V, melhor SNR_N utilizando raios X. A placa IPC, que é a que possui grãos com tamanhos menores e mais uniformes teve melhor desempenho que a IPB.

Em geral, quanto menor o tamanho do grão e a espessura da camada sensível do IP, melhor é a qualidade da imagem. Isso acontece devido ao fato de grãos e camada sensível com grandes dimensões aumentarem a dispersão e a probabilidade de haver estímulo pela luz de luminescência emitida por outros grãos, prejudicando a qualidade da imagem.

Contudo, nas imagens obtidas com a placa HR, a SNR_N foi maior para os CPs mais espessos (grupos VI a VIII) utilizando raios X e para 87% dos casos com radiação γ . Isso porque IPs com pior resolução apresentam maior sensibilidade, ou seja, melhor eficiência na absorção dos fótons.

Além disso, o IPA foi o que apresentou menos imagens reprovadas na detectabilidade com 6%, seguido do IPC com 12% e, por último, o IPB com 19%. Esse resultado permitiu verificar a importância de se fazer uma avaliação precisa das imagens radiográficas a partir do estudo, não somente dos parâmetros de qualidade de imagem, como também da detectabilidade alcançada por elas.

4.3.2 - Validação do Procedimento

As Tabelas 4.17 a 4.26 mostram os valores obtidos na etapa de validação do procedimento para a exposição, contraste, BSR, SNR_N e detectabilidade, utilizando raios X e γ .

Tabela 4.17 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S1, com fonte de raios X

Grupo	Identificação CP	Exposição (mA.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR_N	Detectabilidade
			Centro	Lado			
I	533A	40	14	14	100	170	Sim
	533B	40	14	14	100	165	Sim
	533C	28	14	14	100	165	Sim
II	635A	44	13	14	100	165	Sim
	635B	88	13	14	100	185	Sim
	635C	72	13	13	100	180	Sim
III	711A	56	13	13	100	150	Sim
	711B	56	13	13	100	160	Sim
	711C	56	14	13	100	150	Sim
IV	953A	120	14	13	100	170	Sim
	953B	120	13	13	100	175	Sim
	953C	120	13	13	100	170	Sim
	953D	120	14	13	100	170	Sim
V	1270A	63	11	12	100	160	Sim
	1270B	63	12	12	100	150	Sim
	1270C	63	13	12	100	150	Sim
	1270D	63	13	12	100	140	Sim
VI	1826A	126	12	11	100	160	Sim
	1826B	126	12	12	100	190	Sim
	1826C	76	12	12	100	160	Sim
	1826D	126	11	12	100	180	Sim
	1826F	126	12	12	100	185	Sim
	1826G	126	12	12	100	185	Sim
VII	2540A	96	11	11	100	170	Sim
	2540B	144	11	11	100	170	Não
	2540C	144	10	11	100	180	Sim
	2540D	123	11	10	100	175	Sim
VIII	3571A	151	9	10	130	130	Não
	3571B	151	9	10	130	130	Não
	3571C	168	9	9	130	130	Não
	3571D	168	11	11	130	130	Não

Tabela 4.18 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S2, com fonte de raios X

Grupo	Identificação CP	Exposição (mA.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR_N	Detectabilidade
			Centro	Lado			
I	533A	360	14	15	80	160	Sim
	533B	360	14	14	80	170	Sim
	533C	360	14	15	80	150	Sim
II	635A	120	14	14	80	110	Sim
	635B	120	15	14	80	110	Sim
	635C	120	13	14	80	110	Sim
III	711A	320	13	13	100	130	Sim
	711B	320	14	14	80	150	Sim
	711C	320	15	14	80	145	Sim
IV	953A	440	14	14	80	135	Sim
	953B	440	13	13	100	105	Sim
	953C	800	13	13	80	160	Sim
	953D	800	13	14	80	175	Sim
V	1270A	495	12	12	100	120	Sim
	1270B	495	13	12	100	117	Sim
	1270C	495	12	12	100	110	Sim
	1270D	495	12	13	100	120	Sim
VI	1826A	728	12	12	100	130	Sim
	1826B	728	12	12	100	135	Sim
	1826C	728	12	12	100	135	Sim
	1826D	728	12	12	100	135	Sim
	1826F	728	12	12	100	135	Sim
	1826G	728	12	12	100	135	Sim
VII	2540A	1440	11	11	100	160	Sim
	2540B	2340	11	11	100	170	Não
	2540C	2340	11	10	100	175	Sim
	2540D	2340	12	11	100	180	Sim
VIII	3571A	2772	9	10	100	170	Não
	3571B	2772	10	10	130	125	Não
	3571C	2772	11	11	130	120	Não
	3571D	2772	9	10	130	125	Não

Tabela 4.19 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S3, com fonte de raios X

Grupo	Identificação CP	Exposição (mA.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR_N	Detectabilidade
			Centro	Lado			
I	533A	120	15	15	50	210	Sim
	533B	120	14	14	50	210	Sim
	533C	120	13	14	50	160	Sim
II	635A	60	13	13	50	155	Sim
	635B	120	14	14	50	195	Sim
	635C	120	13	14	50	195	Sim
III	711A	140	14	14	50	200	Sim
	711B	140	14	13	50	190	Sim
	711C	140	14	14	50	185	Sim
IV	953A	208	14	13	50	175	Sim
	953B	208	13	14	50	185	Sim
	953C	280	13	13	50	195	Sim
	953D	280	13	13	50	195	Sim
V	1270A	172	12	13	50	200	Sim
	1270B	172	13	13	50	205	Sim
	1270C	172	13	13	50	185	Sim
	1270D	172	12	13	50	195	Sim
VI	1826A	232	12	12	65	145	Sim
	1826B	232	12	12	65	155	Sim
	1826C	232	12	12	65	125	Sim
	1826D	232	12	12	65	150	Sim
	1826F	232	12	12	65	150	Não
	1826G	232	12	11	65	140	Sim
VII	2540A	232	12	12	65	155	Sim
	2540B	300	10	11	80	130	Não
	2540C	300	11	11	80	130	Sim
	2540D	450	11	11	80	140	Sim
VIII	3571A	450	11	11	80	135	Não
	3571B	330	9	9	160	65	Não
	3571C	330	9	9	100	100	Não
	3571D	330	9	9	130	80	Não

Tabela 4.20 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S4, com fonte de raios X

Grupo	Identificação CP	Exposição (mA.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR_N	Detectabilidade
			Centro	Lado			
I	533A	152	14	15	50	210	Sim
	533B	152	15	14	50	200	Sim
	533C	152	15	14	50	185	Sim
II	635A	60	14	14	65	145	Sim
	635B	120	15	14	50	200	Sim
	635C	120	13	15	50	195	Sim
III	711A	180	14	15	65	155	Sim
	711B	180	14	14	65	160	Sim
	711C	180	15	14	50	200	Sim
IV	953A	260	13	13	65	150	Sim
	953B	260	13	13	65	150	Sim
	953C	260	14	13	50	205	Sim
	953D	260	13	13	50	215	Sim
V	1270A	198	13	13	80	125	Sim
	1270B	198	13	13	65	145	Sim
	1270C	198	13	13	80	120	Sim
	1270D	198	13	13	65	155	Sim
VI	1826A	308	12	12	80	125	Sim
	1826B	308	12	12	65	165	Sim
	1826C	308	12	12	80	125	Sim
	1826D	364	12	12	80	130	Sim
	1826F	364	12	12	80	125	Sim
	1826G	364	12	12	80	135	Sim
VII	2540A	330	11	11	80	125	Sim
	2540B	360	11	10	80	130	Não
	2540C	360	10	10	80	130	Não
	2540D	360	11	11	80	135	Sim
VIII	3571A	515	9	9	100	100	Não
	3571B	515	10	10	130	75	Não
	3571C	515	9	10	100	105	Não
	3571D	515	10	10	100	100	Não

Tabela 4.21 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S5, com fonte de raios X

Grupo	Identificação CP	Exposição (mA.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR_N	Detectabilidade
			Centro	Lado			
I	533A	120	15	15	50	225	Sim
	533B	120	15	16	50	225	Sim
	533C	64	15	15	50	180	Sim
II	635A	40	14	14	50	155	Sim
	635B	40	15	14	50	155	Sim
	635C	40	13	13	50	155	Sim
III	711A	144	14	15	50	215	Sim
	711B	144	13	14	50	220	Sim
	711C	144	15	15	50	220	Sim
IV	953A	192	13	13	50	165	Sim
	953B	192	14	13	50	200	Sim
	953C	192	13	13	50	205	Sim
	953D	192	13	13	50	210	Sim
V	1270A	165	13	13	50	205	Sim
	1270B	165	13	13	65	166	Sim
	1270C	165	13	13	50	210	Sim
	1270D	165	13	13	50	210	Sim
VI	1826A	216	12	12	65	160	Sim
	1826B	216	12	12	65	150	Sim
	1826C	216	12	12	65	160	Sim
	1826D	216	12	12	80	125	Sim
	1826F	216	12	12	65	150	Sim
	1826G	216	12	12	65	160	Sim
VII	2540A	180	11	12	80	125	Sim
	2540B	270	12	10	80	140	Não
	2540C	270	11	11	80	145	Sim
	2540D	270	11	11	80	140	Sim
VIII	3571A	392	10	10	100	110	Não
	3571B	588	11	9	100	120	Não
	3571C	392	10	10	100	110	Não
	3571D	392	10	10	100	105	Não

Tabela 4.22 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S1, com fonte de raios γ

Grupo	Identificação CP	Atividade (Ci)	Exposição ($\times 10^3$ Ci.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR_N	Detectabilidade
				Centro	Lado			
I	533A	52,1	17,2	13	12	100	160	Sim
	533B	52,1	17,2	13	13	100	150	Sim
	533C	51,3	17,4	13	13	100	160	Sim
II	635A	52,4	12,6	12	12	100	140	Sim
	635B	52,1	12,5	13	12	100	145	Sim
	635C	52,1	17,2	12	12	100	145	Sim
III	711A	52,4	15,7	12	12	100	150	Sim
	711B	52,4	15,7	12	13	100	150	Sim
	711C	52,4	15,7	13	13	100	150	Sim
IV	953A	52,8	11,1	12	12	100	142	Sim
	953B	52,8	11,1	12	12	100	140	Sim
	953C	52,8	11,1	12	12	100	150	Sim
	953D	52,4	16,2	12	12	100	140	Sim
V	1270A	53,1	21,2	11	11	100	160	Sim
	1270B	53,1	21,2	11	11	100	160	Sim
	1270C	53,1	21,2	11	11	100	140	Sim
	1270D	53,1	21,2	12	12	100	160	Sim
VI	1826A	74,5	19,4	9	9	160	107	Não
	1826B	53,6	19,3	10	9	160	90	Não
	1826C	53,6	19,3	8	9	160	95	Não
	1826D	53,6	19,3	9	9	160	90	Não
	1826F	53,6	19,3	9	9	200	70	Não
	1826G	53,6	19,3	9	9	160	90	Não
VII	2540A	73,1	26,3	10	11	160	125	Sim
	2540B	72,4	26,1	8	9	200	84	Não
	2540C	72,4	26,1	9	9	160	109	Sim
	2540D	72,4	26,1	10	8	160	105	Não
VIII	3571A	Reprovado na Qualificação						
	3571B							
	3571C							
	3571D							

Tabela 4.23 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S2, com fonte de raios γ

Grupo	Identificação CP	Atividade (Ci)	Exposição ($\times 10^3$ Ci.s)	Contraste		BSR (μ m)	SNR_N	Detectabilidade
				Centro	Lado			
I	533A	52,1	25,0	13	12	100	160	Sim
	533B	52,1	25,0	13	13	100	155	Sim
	533C	51,3	25,1	13	13	100	160	Sim
II	635A	52,4	17,3	12	12	100	150	Sim
	635B	52,1	17,2	13	13	100	150	Sim
	635C	52,1	26,6	12	13	100	140	Sim
III	711A	52,4	28,3	12	12	100	160	Sim
	711B	52,4	22,0	13	12	100	150	Sim
	711C	52,4	22,0	13	13	100	150	Sim
IV	953A	52,8	20,6	12	12	100	160	Sim
	953B	52,8	20,6	12	12	100	160	Sim
	953C	52,8	20,6	12	11	100	150	Sim
	953D	52,8	20,6	12	12	100	155	Sim
V	1270A	53,1	22,3	11	11	100	150	Sim
	1270B	53,1	22,3	11	11	100	155	Sim
	1270C	53,1	22,3	12	12	100	150	Sim
	1270D	53,1	22,3	12	11	100	150	Sim
VI	1826A	73,8	40,6	11	10	160	120	Não
	1826B	71,7	40,5	9	10	160	115	Não
	1826C	71,7	40,5	10	10	160	110	Não
	1826D	71,7	40,5	10	10	160	115	Não
	1826F	53,6	41,3	10	9	160	103	Não
	1826G	53,6	41,3	9	9	160	101	Não
VII	2540A	73,1	92,1	10	9	200	97	Não
	2540B	72,4	91,2	9	9	160	119	Sim
	2540C	72,4	91,2	10	9	160	117	Sim
	2540D	72,4	91,2	10	9	200	95	Não
VIII	3571A	Reprovado na Qualificação						
	3571B							
	3571C							
	3571D							

Tabela 4.24 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S3, com fonte de raios γ

Grupo	Identificação CP	Atividade (Ci)	Exposição ($\times 10^3$ Ci.s)	Contraste		BSR (μm)	SNR_N	Detectabilidade
				Centro	Lado			
I	533A	52,1	56,3	13	13	50	210	Sim
	533B	52,1	62,5	13	13	50	210	Sim
	533C	51,3	56,4	12	13	65	170	Sim
II	635A	52,4	56,6	13	13	50	210	Sim
	635B	52,1	62,5	12	13	65	165	Sim
	635C	52,1	62,5	13	12	65	160	Sim
III	711A	52,8	63,4	12	12	65	160	Sim
	711B	52,4	62,9	12	13	65	175	Sim
	711C	52,4	62,9	12	13	65	155	Sim
IV	953A	52,8	63,4	12	11	80	168	Sim
	953B	52,8	63,4	12	12	80	160	Sim
	953C	52,8	63,4	12	12	65	155	Sim
	953D	52,4	91,2	12	12	65	180	Sim
V	1270A	53,1	89,2	11	11	80	115	Sim
	1270B	53,1	89,2	11	11	65	150	Sim
	1270C	53,1	89,2	11	11	50	185	Sim
	1270D	53,1	89,2	11	11	80	120	Sim
VI	1826A	Reprovado na Qualificação						
	1826B							
	1826C							
	1826D							
	1826F							
	1826G							
VII	2540A	Reprovado na Qualificação						
	2540B							
	2540C							
	2540D							
VIII	3571A	Reprovado na Qualificação						
	3571B							
	3571C							
	3571D							

Tabela 4.25 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N , obtidos na etapa de validação para o sistema S4, com fonte de raios γ

Grupo	Identificação CP	Atividade (Ci)	Exposição ($\times 10^3$ Ci.s)	Contraste		BSR (μm)	SNR_N	Detectabilidade
				Centro	Lado			
I	533A	52,1	45,3	13	13	65	160	Sim
	533B	52,1	45,3	14	13	65	165	Sim
	533C	51,3	45,7	13	12	80	140	Sim
II	635A	52,1	53,1	13	13	80	135	Sim
	635B	52,1	53,1	13	13	80	135	Sim
	635C	52,1	53,1	13	13	80	130	Sim
III	711A	52,4	50,3	12	12	65	155	Sim
	711B	52,4	39,8	13	13	80	125	Sim
	711C	52,4	39,8	13	13	80	130	Sim
IV	953A	52,8	45,9	12	12	80	125	Sim
	953B	52,8	45,9	12	12	80	122	Sim
	953C	52,8	45,9	12	12	80	120	Sim
	953D	52,8	45,9	12	12	80	120	Sim
V	1270A	53,1	54,2	12	12	80	120	Sim
	1270B	53,1	54,2	12	12	80	125	Sim
	1270C	53,1	54,2	12	11	80	125	Sim
	1270D	53,1	54,2	11	12	80	120	Sim
VI	1826A	Reprovado na Qualificação						
	1826B							
	1826C							
	1826D							
	1826F							
	1826G							
VII	2540A	Reprovado na Qualificação						
	2540B							
	2540C							
	2540D							
VIII	3571A	Reprovado na Qualificação						
	3571B							
	3571C							
	3571D							

Tabela 4.26 - Valores de exposição, contraste, BSR e SNR_N, obtidos na etapa de validação para o sistema S5, com fonte de raios γ

Grupo	Identificação CP	Atividade (Ci)	Exposição (x10 ³ Ci.s)	Contraste ISO		BSR (μm)	SNR _N	Detectabilidade
				Centro	Lado			
I	533A	52,1	35,9	14	14	65	170	Sim
	533B	52,1	35,9	14	14	65	170	Sim
	533C	51,3	36,2	13	13	65	170	Sim
II	635A	52,4	39,3	13	13	65	180	Sim
	635B	52,4	39,3	12	13	80	140	Sim
	635C	52,1	39,1	13	13	65	170	Sim
III	711A	52,8	27,5	13	13	65	145	Sim
	711B	52,4	32,0	13	13	65	155	Sim
	711C	52,4	33,0	13	13	65	155	Sim
IV	953A	52,8	33,3	12	12	80	124	Sim
	953B	52,8	33,3	12	12	80	124	Sim
	953C	52,8	33,3	12	12	65	150	Sim
	953D	52,4	39,3	12	12	80	130	Sim
V	1270A	53,1	54,2	12	12	80	130	Sim
	1270B	53,1	54,2	12	12	65	160	Sim
	1270C	53,1	54,2	12	11	65	165	Sim
	1270D	53,1	54,2	12	12	80	130	Sim
VI	1826A	Reprovado na Qualificação						
	1826B							
	1826C							
	1826D							
	1826F							
	1826G							
VII	2540A	73,1	110	10	10	200	60	Não
	2540B	72,4	109	10	9	160	75	Não
	2540C	73,1	110	11	11	160	79	Não
	2540D	72,4	109	10	9	160	75	Não
VIII	3571A	Reprovado na Qualificação						
	3571B							
	3571C							
	3571D							

As Figuras 4.19 a 4.22 ilustram algumas imagens obtidas nesta etapa, com visualização dos resultados encontrados. O valor destacado em verde representa a SNR_N na região selecionada da imagem, a seta amarela aponta o menor fio ISO visível e o retângulo azul mostra o primeiro fio duplo não discernível para determinação da BSR.

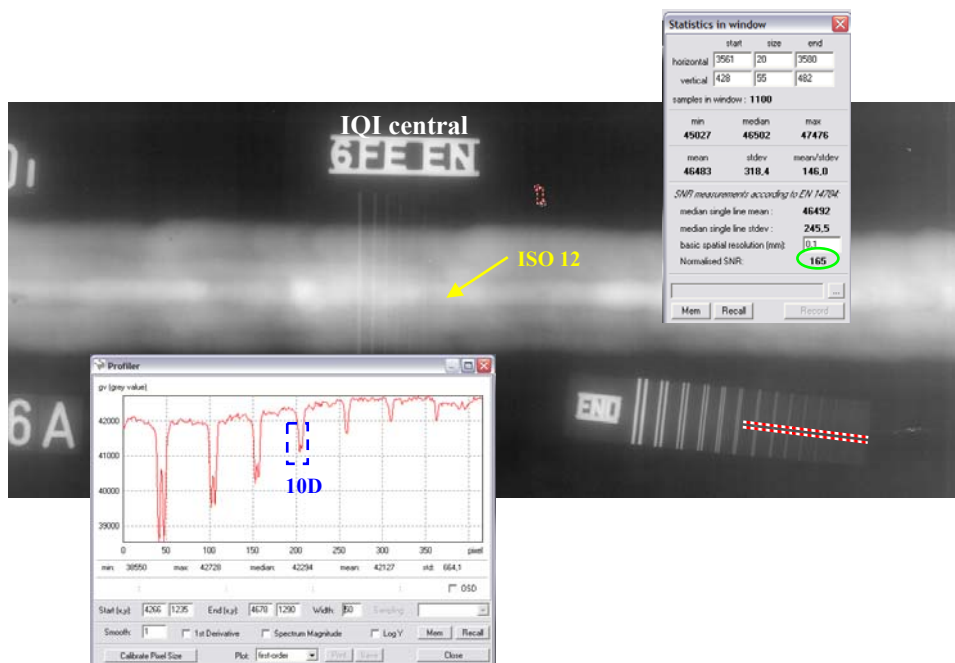


Figura 4.19 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 1826A, utilizando o sistema S1 e raios X

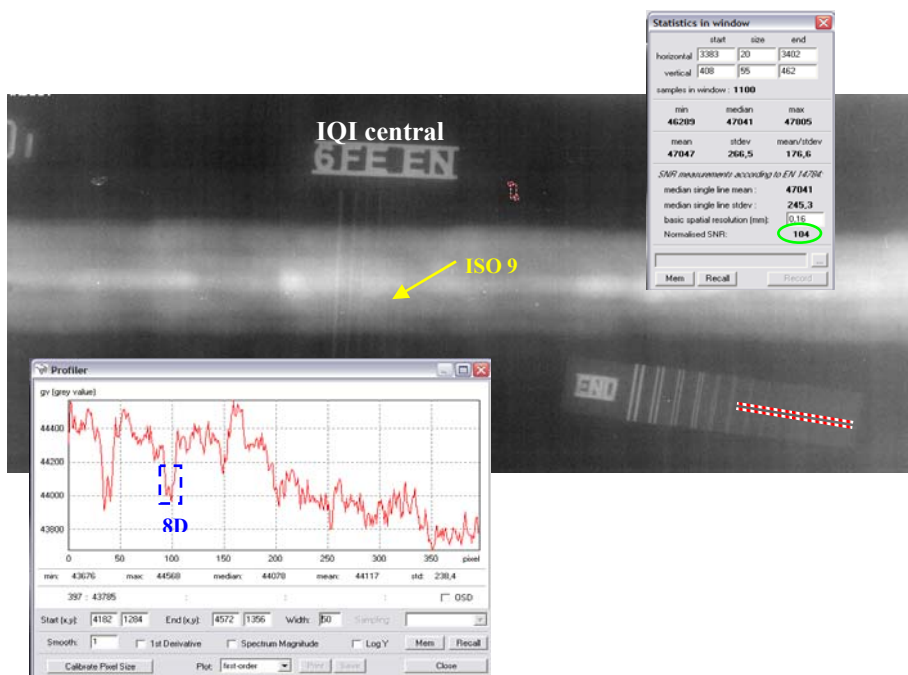


Figura 4.20 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 1826A, utilizando o sistema S1 e ^{192}Ir

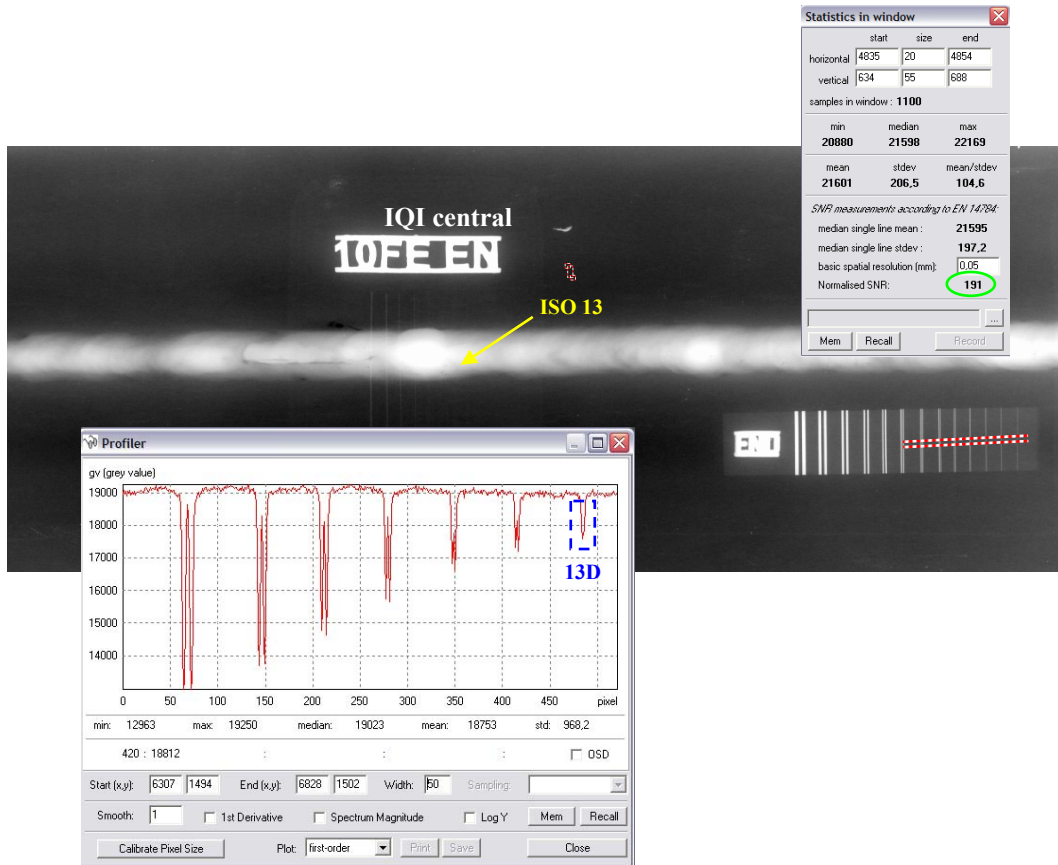


Figura 4.21 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 635C, utilizando o sistema S3 e raios X

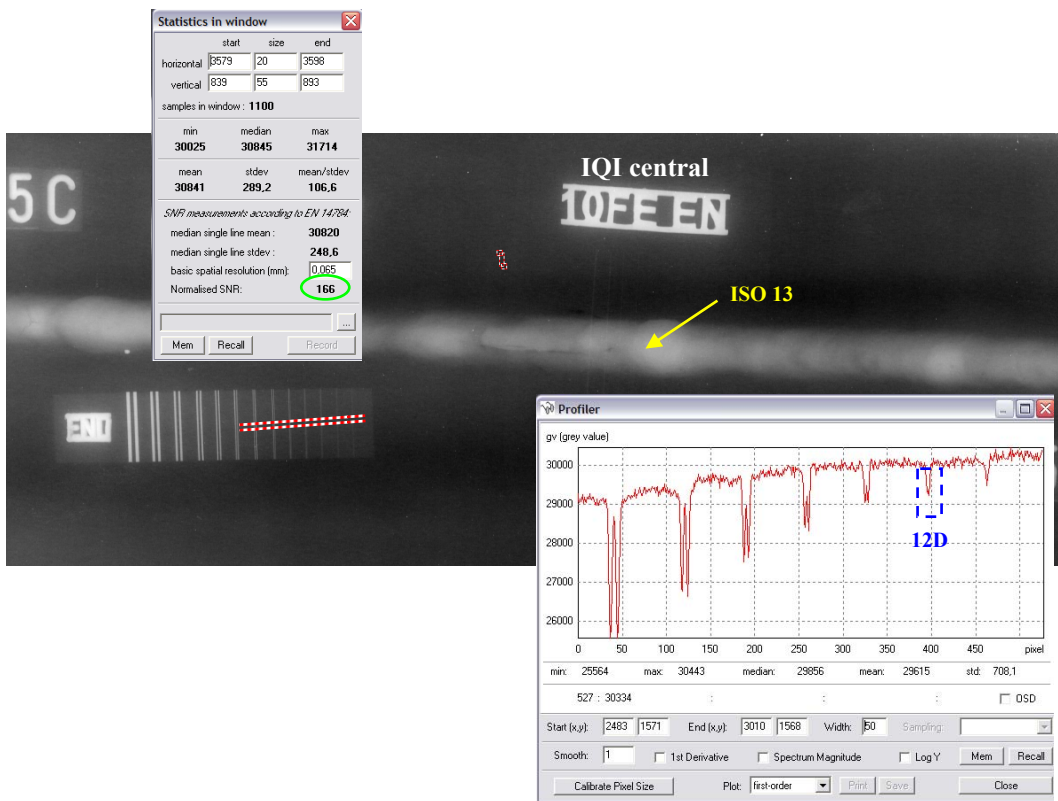


Figura 4.22 - Imagem radiográfica computadorizada do CP 635C, utilizando o sistema S3 e ⁷⁵Se

A Figura 4.23 mostra as imagens radiográficas do CP 635C, utilizando ^{75}Se , com a radiografia convencional e os cinco sistemas de RC. O menor fio ISO encontrado está destacado com uma seta amarela.

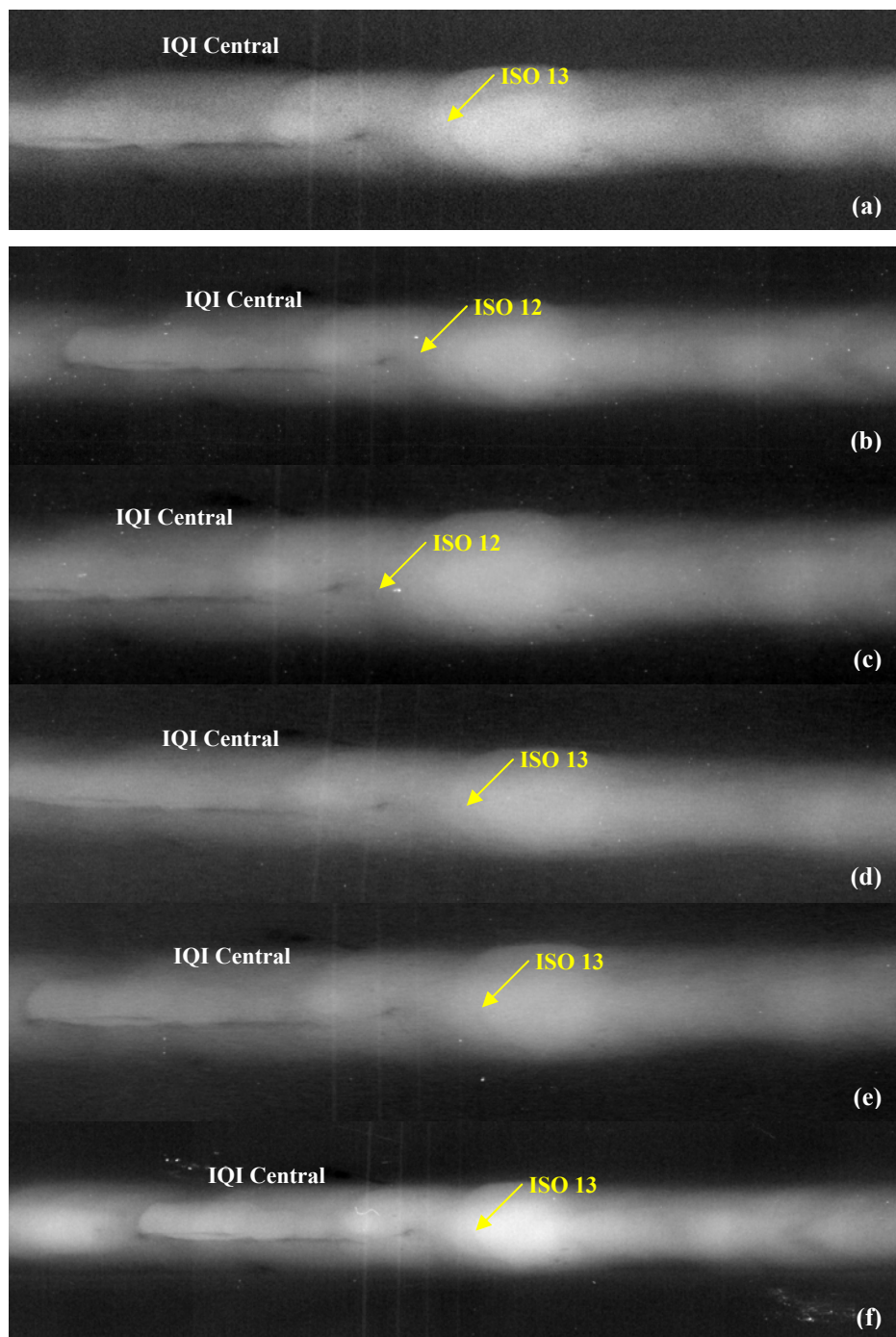


Figura 4.23 - Imagens radiográficas do CP 635C, utilizando ^{75}Se , com (a) radiografia convencional e os sistemas (b) S1, (c) S2, (d) S3, (e) S4 e (f) S5

As Figuras 4.24 e 4.25 mostram os gráficos da comparação entre os valores de exposição requeridos pelos sistemas de RC e pela radiografia convencional, para fontes de raios X e γ , respectivamente. Para construção dos mesmos, foi utilizado o maior valor de exposição para cada CP.

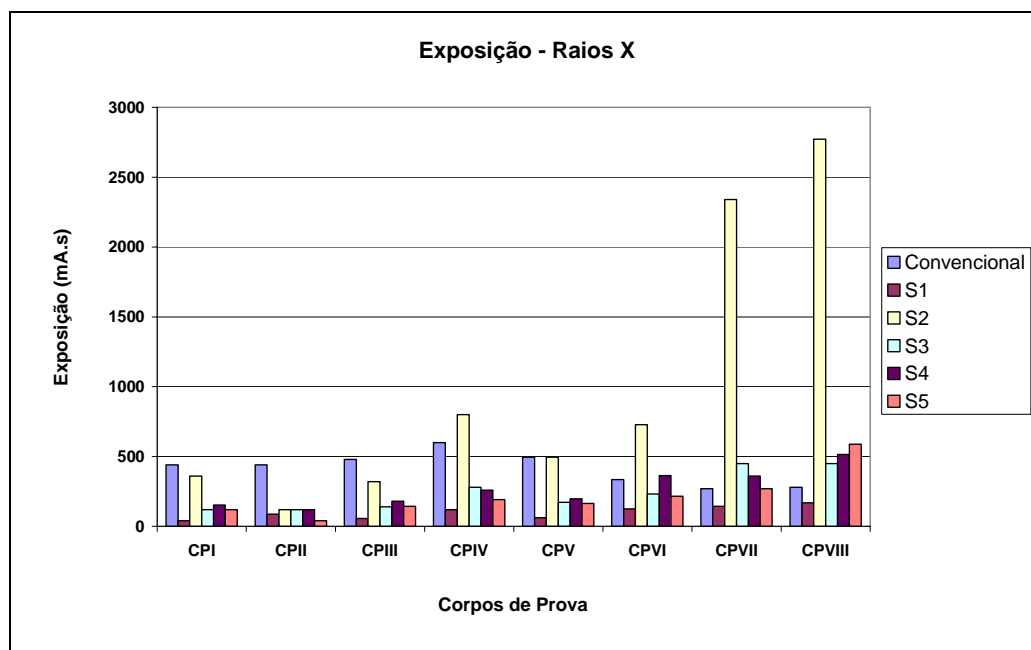


Figura 4.24 - Comparação dos valores de exposição, para fonte de raios X, requeridos pelos sistemas de RC e pela radiografia convencional, na etapa de validação

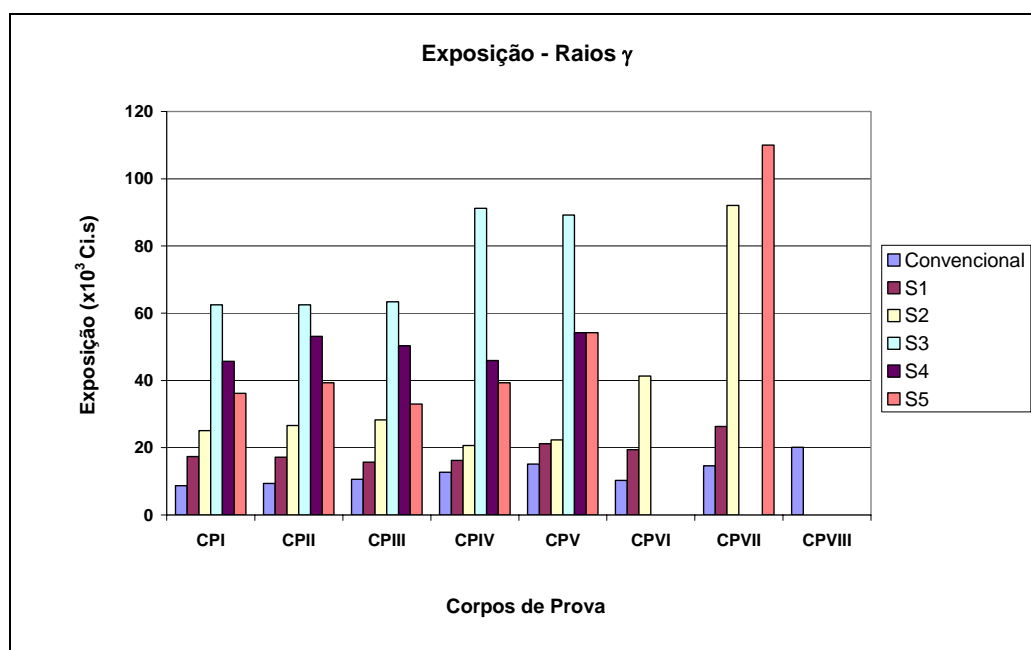


Figura 4.25 - Comparação dos valores de exposição, para fonte de raios γ , requeridos pelos sistemas de RC e pela radiografia convencional, na etapa de validação

Utilizando raios X, o valor da exposição para a RC foi menor em 77% dos casos. Somente o sistema S2 apresentou, para a maioria dos CPs, o tempo de exposição maior que o utilizado para as radiografias convencionais, comportamento esse também observado na etapa anterior, explicado pela sua limitação de trabalhar com potência do laser baixa para imagens com raios X.

Outro comportamento que se repetiu nesta etapa foi os elevados valores da exposição para os raios γ , onde todos estes foram maiores que os utilizados na técnica convencional, já que, para esse tipo de fonte, os IPs utilizados apresentam baixa eficiência de detecção. Este comportamento ocorreu também devido às características de baixa sensibilidade dos IPs utilizados, ocasionando maior tempo de exposição e, conseqüentemente, maior espalhamento, contribuindo para o ruído da imagem e influenciando diretamente na detectabilidade do sistema.

Nesta etapa também foram construídos gráficos comparativos entre os valores encontrados para os parâmetros de qualidade da imagem alcançados por cada sistema de RC e os exigidos por norma, os quais estão apresentados nas Figuras 4.26 a 4.31. Como foram radiografados uma série de CPs para cada grupo de espessura, a construção destes gráficos foi feita utilizando a moda dos valores de contraste e BSR e, no caso da SNR_N , o valor associado ao maior tempo de exposição.

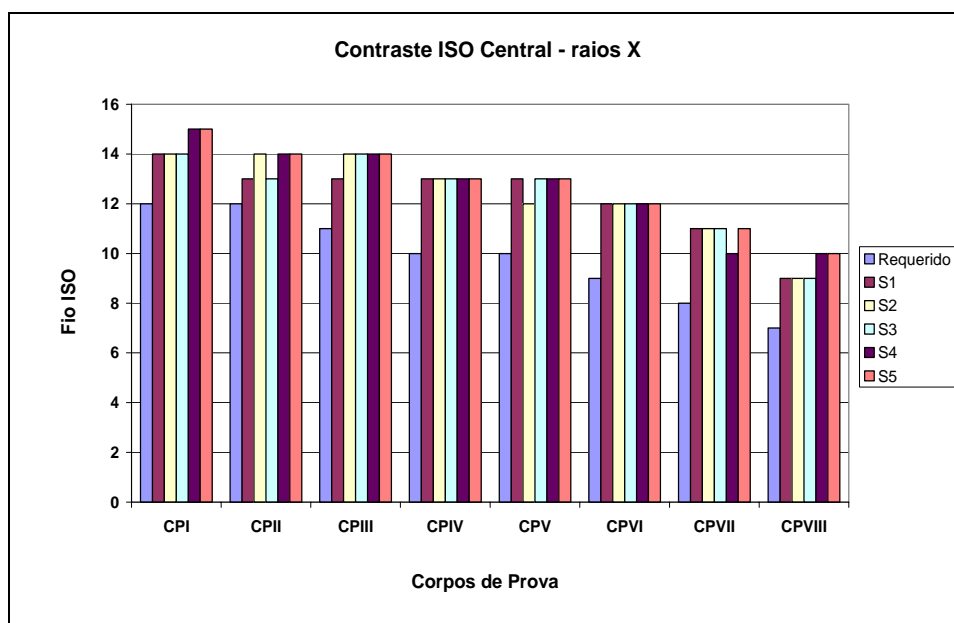


Figura 4.26 - Comparação do contraste IQI ISO central alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios X, na etapa de validação

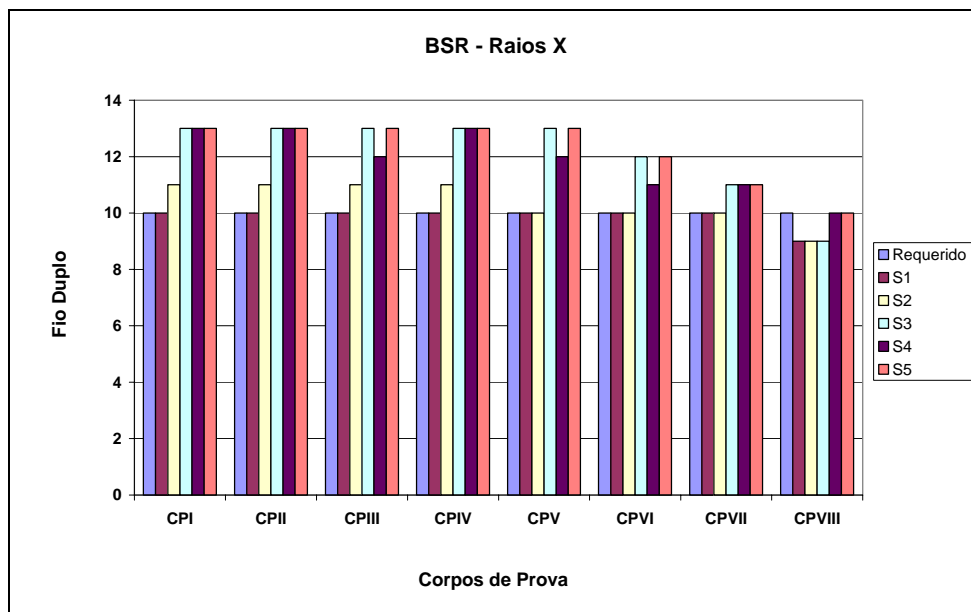


Figura 4.27 - Comparação da BSR alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios X, na etapa de validação

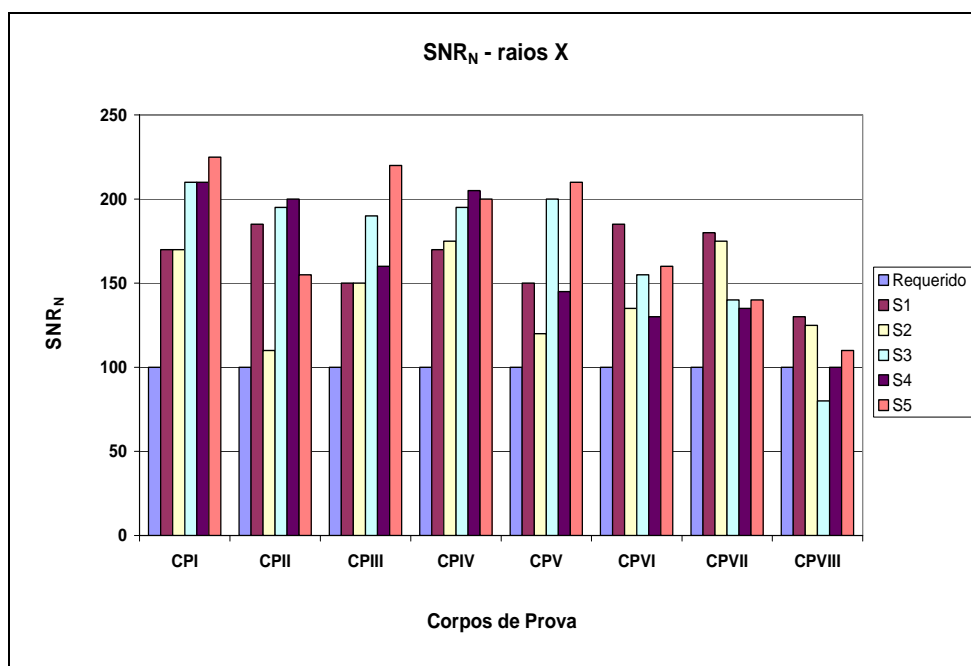


Figura 4.28 - Comparação da SNR_N alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios X, na etapa de validação

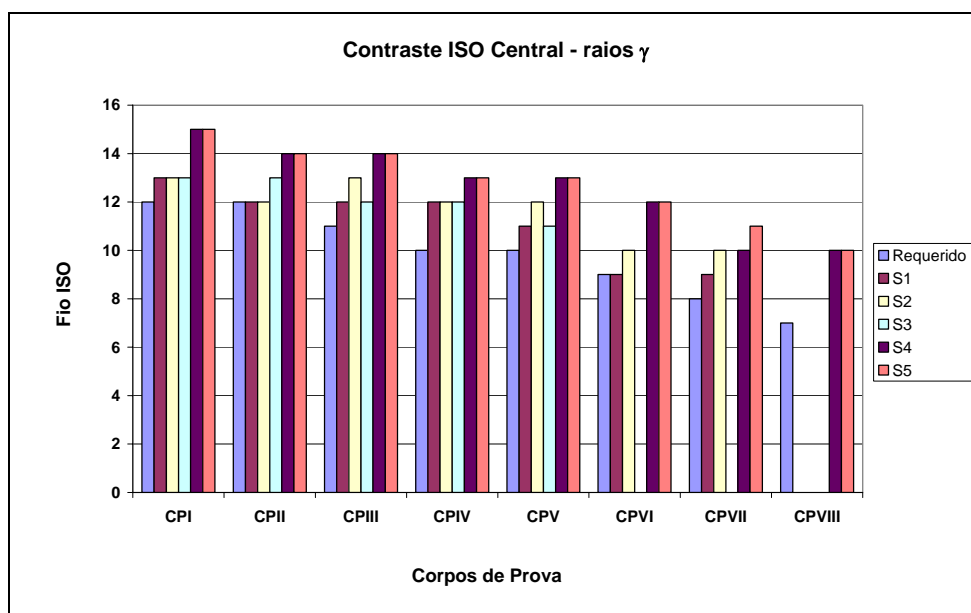


Figura 4.29 - Comparação do contraste IQI ISO central alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios γ , na etapa de validação

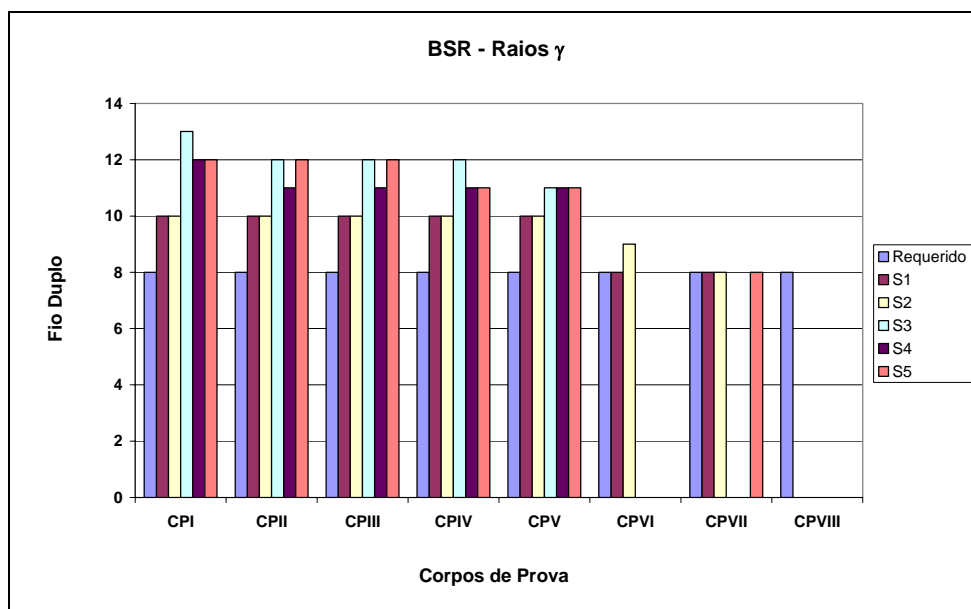


Figura 4.30 - Comparação da BSR alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios γ , na etapa de validação

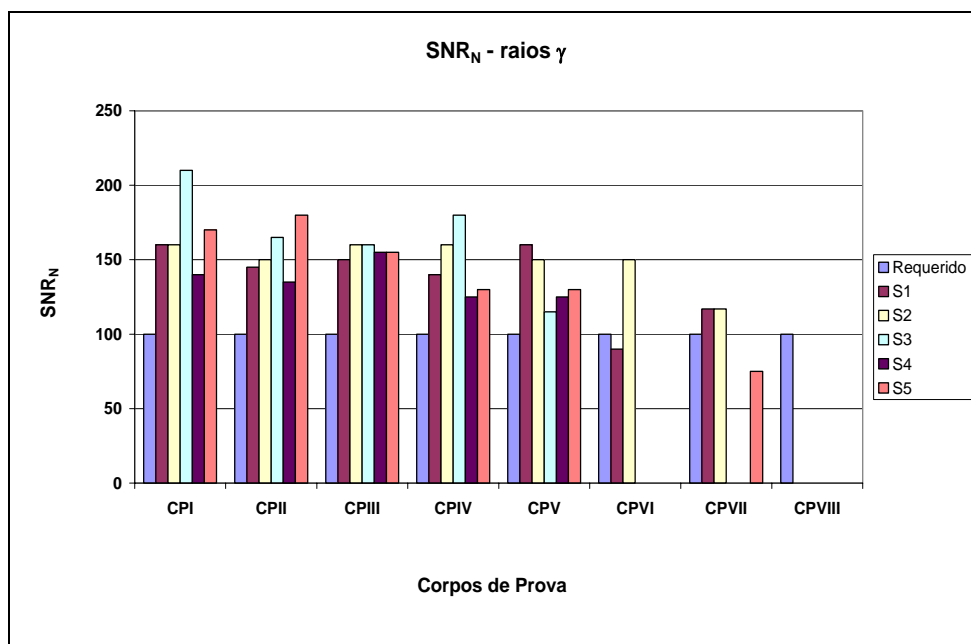


Figura 4.31 - Comparação da SNR_N alcançado pelos sistemas de RC com os requeridos por norma, para fonte de raios γ , na etapa de validação

Também nesta etapa, os parâmetros de qualidade encontrados utilizando fonte de raios X foram melhores que para a fonte γ . Todas as imagens apresentaram valores de contraste aprovados, inclusive superando os valores exigidos na grande maioria dos casos.

Para ambas as fontes de radiação, a detectabilidade foi a principal causa das reprovações, já que os CPs mais espessos (grupos VI, VII e VIII) apresentaram baixa visualização dos defeitos quando comparadas com as imagens obtidas com a técnica convencional.

As Figuras 4.32 e 4.33 mostram dois desses casos em que as imagens obtidas com a RC ficaram reprovadas na detectabilidade. As regiões com defeitos nas chapas estão destacados nas imagens com uma seta azul.

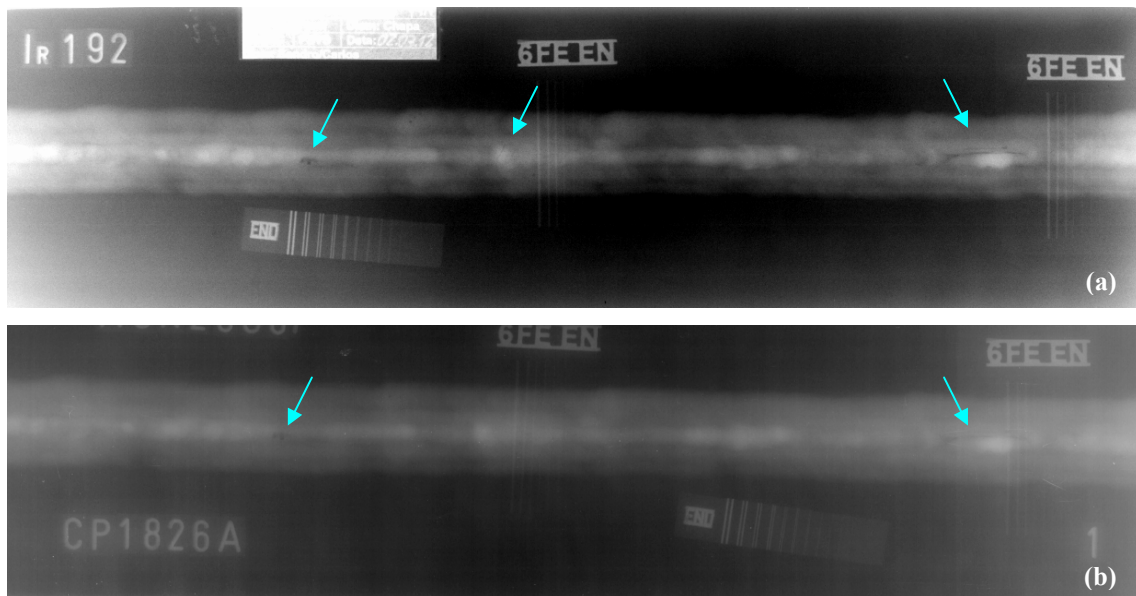


Figura 4.32 - Imagens radiográficas do CP 1826A, utilizando ^{192}Ir , com (a) radiografia convencional e (b) o sistema S1

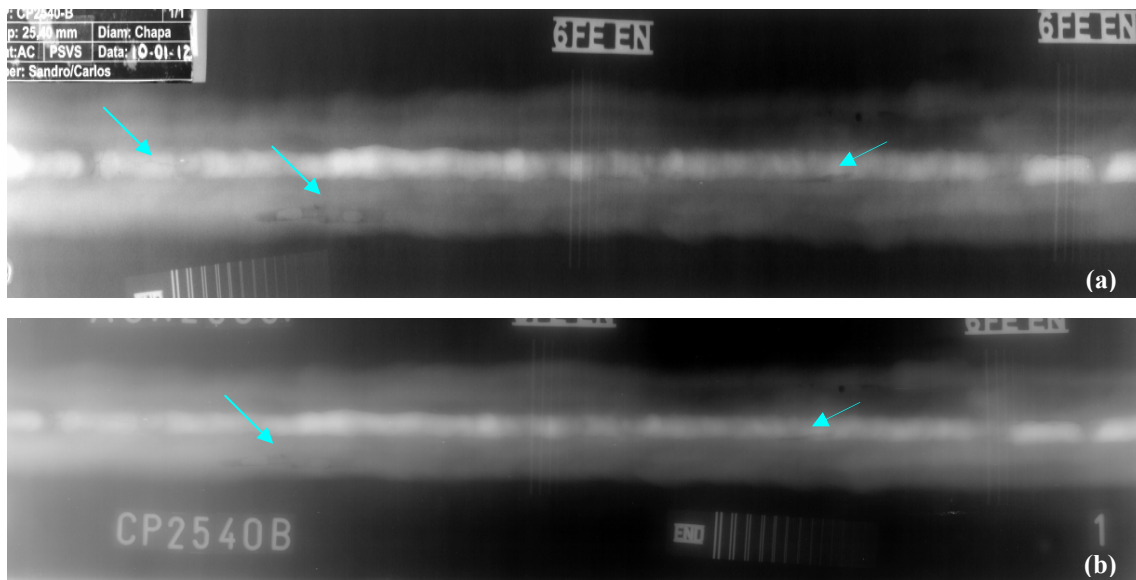


Figura 4.33 - Imagens radiográficas do CP 2540B, utilizando raios X, com (a) radiografia convencional e (b) o sistema S1

As Tabelas 4.27 e 4.28 mostram o percentual de aprovação na análise das imagens para cada sistema de RC, na etapa de validação, utilizando raios X e raios γ , respectivamente.

Tabela 4.27 - Percentual de aprovação na análise das imagens para cada sistema RC, na etapa de validação, utilizando raios X

Grupo	Percentual de Aprovação				
	S1	S2	S3	S4	S5
I	100%	100%	100%	100%	100%
II	100%	100%	100%	100%	100%
III	100%	100%	100%	100%	100%
IV	100%	100%	100%	100%	100%
V	100%	100%	100%	100%	100%
VI	100%	100%	83%	100%	100%
VII	75%	75%	75%	50%	75%
VIII	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 4.28 - Percentual de aprovação na análise das imagens para cada sistema RC, na etapa de validação, utilizando raios γ

Grupo	Percentual de Aprovação				
	S1	S2	S3	S4	S5
I	100%	100%	100%	100%	100%
II	100%	100%	100%	100%	100%
III	100%	100%	100%	100%	100%
IV	100%	100%	100%	100%	100%
V	100%	100%	100%	100%	100%
VI	0%	0%	-	-	-
VII	50%	50%	-	-	0%
VIII	-	-	-	-	-

As imagens obtidas com emprego de raios X dos CPs dos grupos I a VII apresentaram todos os valores dos parâmetros de qualidade da imagem dentro dos requeridos por norma. Dentre estes, apenas três placas (11%) não atingiram detectabilidade, sendo que o CP 2540B ficou reprovado para todos os sistemas, pois uma das trincas no cordão de solda não pode ser visualizada. Para o grupo VIII nenhum sistema teve imagens aprovadas.

Empregando raios γ , todas as exigências foram alcançadas para a fonte de ^{75}Se , ou seja, para os CPs com espessuras dos grupos I a V. Para o grupo VI nenhuma imagem foi aprovada e para o VII houve um total de 67% de reprovações. O grupo VIII não foi aprovado na etapa de qualificação, para este tipo de fonte.

4.4 Discussão dos Resultados

No processo de qualificação do procedimento, todos os sistemas foram qualificados, utilizando fonte de raios X, para todas as faixas de espessura ensaiadas. Para a utilização de fontes γ , o procedimento não pode ser qualificado para todas as faixas de espessura. As imagens obtidas com fonte de ^{75}Se , que foi utilizada para os CPs dos grupos I (5,33 mm) a V (12,70 mm), atingiram resultados aceitáveis, mas as imagens obtidas com ^{192}Ir , que foi utilizado para os grupos VI (18,26 mm) a VIII (35,71 mm), houve um índice de 67% de reprovação.

Na validação do procedimento simulando condições de campo, utilizando fonte de raios X, todas as imagens dos CPs com espessuras dentro dos grupos I a VII (25,40 mm) apresentaram qualidade desejada, reprovando apenas 11% na detectabilidade. Para o grupo VIII todos os sistemas tiveram imagens reprovadas. Com a utilização de raios γ , o procedimento só pode ser validado para a fonte de ^{75}Se (Grupo I a V). Dos sistemas que foram testados nessa etapa, nenhum se mostrou adequado para a inspeção na espessura do grupo VI e para a espessura do grupo VII a aprovação foi de 33%. O grupo VIII não havia sido qualificado para este tipo de fonte.

Utilizando raios X, o tempo de exposição para a RC foi menor que para a radiografia convencional em 73% dos casos. Fato que não ocorreu no emprego de fontes γ , quando 94% das imagens foram obtidas com exposição mais elevada do que com a técnica convencional. Além disso, os parâmetros de qualidade encontrados utilizando fonte de raios X foram melhores. Isso ocorreu porque o IP possui maior eficiência de detecção para este tipo de fonte.

Com relação à performance dos equipamentos de RC e IPs, verificou-se que o maior número de aprovações ocorreu para os sistemas S1 e S2. Ambos foram empregados utilizando a placa IPA, que foi a que apresentou imagens com maior detectabilidade dos defeitos. Sendo que para o S1 as imagens foram obtidas com um tempo de exposição menor, assim este sistema foi o que apresentou melhor desempenho no estudo realizado.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu concluir a viabilidade do emprego da radiografia computadorizada em inspeção de soldas nas situações de campo para a técnica de PSVS, nas faixas de espessuras analisadas, sem perda significativa de qualidade nas imagens.

Para os CPs com espessuras de 5,33 mm a 12,70 mm, o procedimento foi validado em 100% dos casos, para todos os sistemas de RC e com ambas as fontes de radiação. Ou seja, todas as imagens apresentaram valores dentro dos especificados por norma para os parâmetros de qualidade de imagem e detectabilidade equivalente à convencional.

Já os CPs com espessuras de 18,26 mm a 35,71 mm apresentaram imagens com baixa visualização dos defeitos quando comparadas com as imagens obtidas com a técnica convencional. As características de baixa sensibilidade dos IPs utilizados provocam maior tempo de exposição e, conseqüentemente, maior espalhamento, contribuindo para o ruído da imagem, influenciando diretamente na detectabilidade do sistema.

Os resultados obtidos na etapa de caracterização dos IPs em conjunto com as análises das imagens radiográficas permitiram verificar que as propriedades físicas dessas placas interferem diretamente nos parâmetros de qualidade da imagem obtida a partir das mesmas. Em geral, as placas com menor espessura da camada sensível e menor tamanho médio dos grãos apresentaram imagens com melhor BSR. Contudo, nas imagens obtidas com a placa cujas dimensões são maiores, a SNR_N foi melhor para a maior parte dos casos.

Quanto à composição elementar dos IPs, observou-se que além dos elementos já esperados, uma das placas possui Estrôncio e que as placas com melhor resolução possuem maiores concentrações de Bromo e Flúor e menores de Iodo e Bário. Como estes dois últimos apresentam números atômicos mais elevados, as placas com melhor

resolução apresentam menor poder de absorção dos fótons, ou seja, possuem pior sensibilidade.

A partir dos resultados alcançados neste trabalho foi possível validar os procedimentos para emprego da RC em inspeção de soldas para a técnica de PSVS, para a maioria dos CPs analisados. Para as espessuras mais altas, com fonte de ^{192}Ir , serão necessários mais estudos para a sua aplicação, mas para as demais espessuras, utilizando fontes de raios X e ^{75}Se , a técnica estudada pode ser utilizada para inspeções de campo garantindo a qualidade de imagem necessária para este tipo de estudo.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros podem ser citados os seguintes projetos:

- a. Dar continuidade ao estudo, realizando novas exposições com um número maior de corpos de prova de espessuras dentro das faixas nas quais a validação do procedimento não foi atingida e com variações de defeitos.
- b. Realizar a mesma metodologia aplicada para as técnicas de exposição PDVS e PDVD.
- c. Estudar a utilização de diferentes IPs, com características distintas aos que foram empregados, bem como avaliar o emprego de outros equipamentos de RC para aquisição das imagens radiográficas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDI, 2005, *Curso de inspetor de fabricação – Modulo de Ensaios Não Destrutivos*, São Paulo, SP, Brasil.

AGFA, 1989, *Radiografia industrial*, Agfa Gevaert, N.V., Bélgica.

ANDREUCCI, R., 2003, *Radiologia industrial*, 6 ed. Disponível em: http://www.abend.org.br/down2/radiologia_ind.pdf. Acesso em 20 Nov. 2011, 10:15:30.

ARCAL, 2000, *Reparación, Mantenimiento y Verificación de Equipos de Rayos X*. v. 4.

ASTM E 2445, 2005, Standard Practice for Qualification and Long-Term Stability of Computed Radiology Systems.

ASTM E 2446, 2005, Standard Practice for Classification of Computed Radiology Systems.

ASTM E 1815, 2006, Classification of film systems for industrial Radiography.

BAM, 2007, User Manual for the Measuring Program ISee!, Verson 10.2. Disponível em: <http://www.kb.bam.de/~alex/ic.html>. Acesso em 10 Maio. 2010, 14:30:30.

CASTRO, P., 2002, “Avaliação de corrosão em trocadores de calor, tipo duplo tubo, através da técnica da radiografia computadorizada”. In: *6ª Conferencia sobre Tecnologia de Equipamentos*, Salvador, Brasil.

CORREA, S. C. A., 2005, *Avaliação da Correlação de Grandezas Utilizadas para Determinação de kVp com Contraste da Imagem*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DEPRINS, E., 2005, "Wall thickness measurement and corrosion mapping using computed radiography systems in on-stream applications", *Digital imaging VIII*, ISBN 1-57117-35-5, Mashantucket, USA.

EN 462-1, 1994, Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Part 1: Image quality Indicators (wire type) - Determination of image quality value.

EN 462-5, 1994, Non-destructive testing - Image quality of radiographs - Part 5: Image quality indicators (duplex wire type), determination of image unsharpness value.

EN 14784-1, 2005, Non-destructive testing - Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates - Part 1: Classification of systems.

EN 14784-2, 2005, Non-destructive testing - Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates - Part 2: General principles for testing of metallic materials using X-rays and gamma rays.

EWERT, U., ZSCHERPEL, U., 2000, "Radiographic Testing – A comparison of Standards for Classical and Digital Industrial Radiology".In: *15th World Conference on Nondestructive Testing*, Roma.

EWERT, U., ZSCHERPEL, U., 2002, "Recent Trends in Digital Industrial Radiology". *National Seminar of ISNT*, v. 12, pp. 1-14.

FRIJA, J. *et al.*, 1998, "Computed radiography", *Biomedicine and Pharmacotherapy*, [*Elsevier*](#), v. 52, n. 2, pp. 59-63.

GURVICH *et al.*, 1996, "Phosphors for Luminescence Imaging Plates", *Journal of X-ray Science and Technology*, v. 6, pp. 48-62.

HELMER, R. G. *et al.*, 1998, *Gamma-Ray Spectrum Catalogue – Ge and Si Detectors Spectra*, Idaho National Engineering & Environmental Laboratory, Idaho, USA.

ISO 19232-1, 2004, Non-destructive testing - Image quality of radiographs - Part 1: Image quality indicators (wire type) - Determination of image quality value.

ISO 19232-5, 2004, Non-destructive testing - Image quality of radiographs - Part 5: Image quality indicators (duplex wire type) - Determination of image unsharpness value.

JELFS, S., 2009, "Optimized Digital Radiography Using Co-60, Ir-192 and Se-75 Sources to Achieve Weld - Quality Images". In: *National Seminar & Exhibition on NDE - Non-Destructive Evaluation*, USA.

KNOLL, G. F., 1989, *Radiation Detection and Measurement*, 2 ed, New York, John Willey & Sons.

KODAK, 1980, *Radiography in Modern industry*, Forth Edition, Eastman Kodak Company, New York.

MACHADO, A. S., 2011, *Estudo Comparativo da Radiografia Convencional e Computadorizada para Análise de Ligas Metálicas*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MANGO, S. A., 2004, "Transitioning to Digital Radiography – When does it make sense?". In: *16th WCNDT – World Conference on NDT*, Montreal, Canada.

MANGO, S. A., 2006, "How to Evaluate the Radiographic Performance Envelope of a Computed Radiography System", *Materials Evaluation*, v. 64, n. 3, pp. 297-302.

MANGO, S. A., 2007, "How to evaluate the radiographic performance and long-term stability of a computed radiography system". In: *IV Conferencia Panamericana de END*, Buenos Aires, Argentina.

MANOHARAN, V. *et al.*, 2008, "Computed Radiography with Isotopes- Suitability for Weld Inspection". In: *17th World Conference on Nondestructive Testing*, Shanghai, China.

MIYAHARA, J., 1989, “Visualizing things never seen before – The Imaging Plate: A new radiation image sensor”, *Chemistry Today*, v. 223, pp. 29-36.

MOREIRA, E. V., 2007, *Aplicação da Radiografia Digital Utilizando Detectores Planos Para Inspeção de Soldas de Gasodutos e Oleodutos*. Dissertação de M.Sc., Universidade de Taubaté, SP, Brasil.

NASCIMENTO, J. R., 2012, *Estudo Comparativo de Sistemas de Radiografia Digital na Inspeção de Solda*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLIVEIRA, F. M., 2004, *Estudo de Sistema de Radiografia Computadorizada com Uso de Placas de Fósforo*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLIVEIRA, D. F., 2007, *Análise da Radiografia Computadorizada em Condições de Águas Profunda*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLIVEIRA, D. F., 2010, *Desenvolvimento de Sistema de Inspeção por Técnicas Radiográficas na Análise de Perda de Adesão em Dutos Compósitos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLIVEIRA, D. F. *et al.*, 2011, “Evaluation of the Influence of the Parameters which Characterize the Image Plate Regarding the Quality of Digital Radiographic Images”. In: *INAC - International Nuclear Atlantic Conference*, Belo Horizonte, Brasil.

PETROBRAS N2821-B, 2007, *Ensaio Não Destrutivo: Radiografia Computadorizada em Juntas Soldadas*.

PR-007, 2004, *Raios X e Gama Procedimento de END*, manual S-ER, ABENDE.

ROUSSILHE, J., MANGO, S. A., FALLET, E., 2007, “Performance Evaluation of a Computed Radiography System”. In: *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*, Lyon, France.

SCHMIDT, R., 2004, *Radiografia industrial*, Revista ABENDE, Ano I, n. 3, São Paulo.

SCHUBERT, H., 2005, *Filme para RC, RC para DR*. In: 8a. COTEQ, Salvador.

SCURI, A. E., 1999, “Fundamentos da Imagem Digital”. Notas de Aula, Tecgraf/PUC, Rio de Janeiro.

SEGGERN, von H., 1999, “Photostimulable x-ray storage phosphors: a review of presents understanding”, *Brazilian Journal of Physics*, v. 29, n. 2.

SEIBERT J. A. *et al.*, 1997, “Acceptance Testing and Quality Control of Photo Stimulable Imaging Systems”. In: *AAPM – Report of Task Group*, American Institute of Physics, Woodbury, NY.

SILVA, M.C., LAMMOGLIA, P., HERDADE, S.B. *et al.*, 2000, “Determinação da Tensão aplicada a Tubos de Raios X através do Espectro de Bremsstrahlung obtido com um Fotodiodo PIN”, *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, v. 16, pp. 13-20.

SPRAWLS, P., 1995, “*Physical Principles of Medical Imaging, Madison, Wisconsin: Medical Physics*”, 2 ed., Wisconsin, USA.

TAKAHASHI, K., 2002, “Progress in Science and Technology on Photostimulable BaFX:Eu²⁺ (X = Cl, Br, I) and Imaging Plates”, *Journal of Luminescence*, v. 100, pp. 307-315.

TAUHATA, L. *et al.*, 2003, *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 5ª revisão, Rio de Janeiro.

VIDEIRA, J. *et al.*, 2003, “Inspeção de juntas soldas através de radiografia computadorizada como ferramenta de avaliação de engenharia”. In: *3ª Conferência Pan-americana de Ensaios Não Destrutivos*, Rio de Janeiro, Brasil.

WILLEMS, P. *et al.*, 1998, "Applicability of CR for corrosion and Wall Thickness Measurements". In: *7th ECNDT*, Copenhagen, pp 2774 – 2781.

ZSCHERPEL, U. *et al.*, 1998, "Wall Thickness Estimation from Digitized Radiographs". In: *7th ECNDT*, Copenhagen, pp 2819 - 2825

ZSCHERPEL, U., ONEL, Y., EWERT, U., 2000, "New concepts for corrosion Inspection of Pipelines by Digital Industrial Radiology (DIR)". In: *15th World Conference on Nondestructive Testing*, Roma, Italy.

ZSCHERPEL, U. *et al.*, 2007, "Possibilities and Limits of Digital Industrial Radiology: - The new high contrast sensitivity technique - Examples and system theoretical analysis". In: *DIR 2007 - International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography*, Lyon, France.